INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL
CENTRE DE GRIGNON

ANNALES AGRONOMIQUES

VOLUME 20
1969

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 20 1969 NUMÉRO 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149 rue de Grenelle, PARIS-7e

Ann. agron., 1969, **20** (1), 5-14.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA CIRCULATION DE L'EAU SATURANTE DANS DES MILIEUX POREUX ARTIFICIELS

Marielle COURAU

avec la collaboration technique de Irène ROUMAN

Station d'Agronomie et d'Œnologie,
67, Boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Au cours de l'infiltration de l'eau dans des milieux poreux artificiels, l'influence et le mécanisme d'action de la charge et de la succion ont été mis en évidence.

INTRODUCTION

La circulation de l'eau dans le sol pose, dans les domaines de l'irrigation, du ressuyage et de l'assainissement, de nombreux problèmes agronomiques, encore non résolus, bien que leurs implications soient très importantes. Par ailleurs, l'hydraulique s'est développée à partir de lois expérimentales qui ont permis de généraliser l'étude de l'écoulement des fluides. Toutefois, dans les sols, nous serons amenés à considérer différentes conditions précisant les modalités de la circulation de l'eau.

Nous entendrons par filtration la circulation de l'eau saturante à travers une couche de terre d'épaisseur connue ou, plus simplement, au laboratoire, le passage de l'eau à travers une couche de terre séparant deux couches d'eau libre. Dans ces conditions, le phénomène est régi par la loi de Darcy.

Celle-ci montre que la vitesse de filtration V est directement proportionnelle au gradient hydraulique i qui correspond à la perte de charge hydraulique Δ_H par unité de longueur de matériau traversé Δ_l :

$$V = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{\Delta_H}{\Delta_l} = K \cdot i$$

$$i = \frac{\Delta_H}{\Delta_l}$$

k : constante caractéristique du matériau poreux

η : viscosité du fluide

$K = \frac{k}{\eta}$: coefficient de DARCY

Nous entendrons par infiltration la pénétration d'une couche d'eau saturante dans un sol sec. On admet que dans la zone humectée, les phénomènes obéissent à la loi de Darcy, mais à la limite entre la zone humectée et la zone sèche se développent des forces capillaires qui vont contribuer au gradient hydraulique. Ces forces sont déterminées à la fois par la dimension des espaces séparant les particules, leur géométrie, et par la mouillabilité du milieu.

Comme il est très difficile d'évaluer le rôle de ces forces, nous nous sommes proposés, et ce sera l'objet de ce mémoire, en partant de matériaux simples et relativement définis, des quartz calibrés et des billes de verre, de vérifier expérimentalement, pour des cas particuliers, l'action de ces différents facteurs.

La construction de modèles relativement simples, puis de complexité croissante permet une approche théorique de certains mécanismes qui interviennent dans le sol ; nous tenterons ici d'en préciser quelques aspects.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Matériaux

Des milieux homogènes ont été obtenus avec des sables de quartz de granulométrie 20-50 μ. 50-100 μ, 100-200 μ, 200-500 μ, et de porosité 0,47, et des billes de verre d'environ 140 μ et 60 μ de diamètre, de porosité 0,35.

Technique

On a utilisé des colonnes transparentes de section circulaire (5,46 cm²), carrée (9 cm²) et rectangulaire (18 cm²), de 15 à 20 cm de hauteur. Certaines sont munies de piézomètres. Les modèles suivants ont été composés (fig. 1) : colonnes remplies de matériau d'une granulométrie donnée, colonnes de section rectangulaire remplies de deux granulométries d'un même matériau, placées côte à côte sans séparation, colonne de section circulaire remplie de trois granulométries d'un même matériau, accolées sans séparation sur des sections angulaires de $2\pi/3$ radian.

De l'eau est maintenue à niveau constant selon le principe du vase de Mariotte au-dessus des modèles, soit sur toute la surface des colonnes, soit sur la surface de l'un des matériaux. Dans ce cas, une paroi étanche est introduite dans le matériau sur une faible hauteur (fig. 2).

On mesure le long des colonnes l'avancement du front d'eau, les débits au cours de l'infiltration et de la filtration, ainsi que les pertes de charge quand la filtration est établie.

Dans ce type de matériau, l'eau d'infiltration introduite sous charge constante à la surface du système, sature le milieu au fur et à mesure de l'avance du front d'infiltration : il n'y a pas de gradient d'humidité en deçà de ce front.

Le contrôle de la saturation a été réalisé au cours de l'infiltration, en comparant, pendant des intervalles de temps Δ_t, les volumes d'eau (débit enregistré) et les volumes d'air (porosité remplie entre les deux fronts d'infiltration); que les colonnes soient constituées à partir de matériau d'une ou de plusieurs granulométries contiguës, l'écart-type réduit de la différence entre les deux types de mesure est de 1 p. 100 (P = 0,15). Ce résultat est dû principalement à l'imprécision relative des types de mesures, car les écarts indiquent aussi bien un déficit de saturation qu'un excès. On peut donc admettre que la saturation est réalisée.

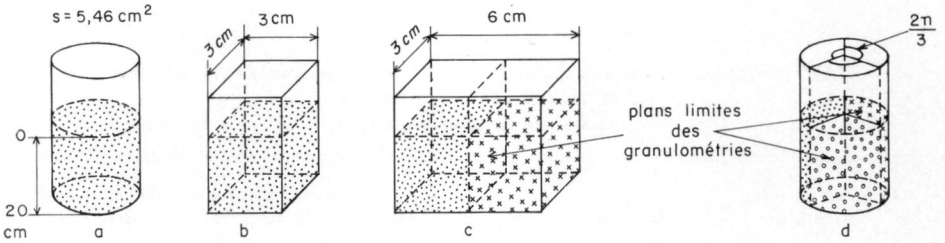


FIG. 1. — *Différents modèles utilisés*
a et *b* : colonnes d'une seule granulométrie,
c et *d* : colonnes de 2 et 3 granulométries, en position contiguë, sans paroi de séparation.

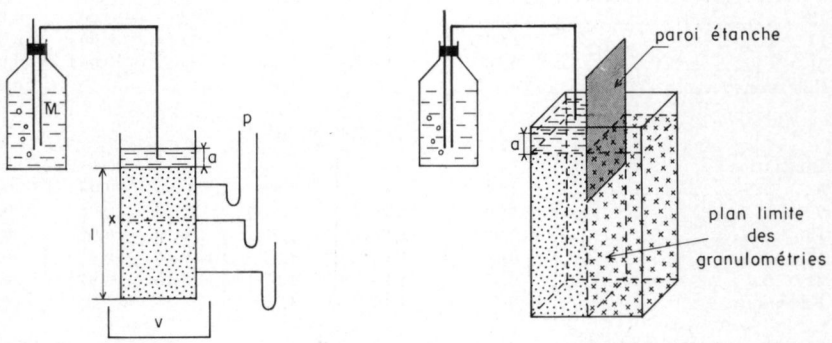


FIG. 2. — *Expérience d'infiltration avec charge maintenue à niveau constant*
(1) sur toute la surface,
(2) sur une partie de la surface
M : vase de Mariotte,
a : lame d'eau,
x : niveau du front d'infiltration à un instant *t*,
l : longueur de la colonne de matériau,
V : récipient de filtration,
P : piézomètres.

RÉSULTATS

1. *Infiltration dans les colonnes de matériaux d'une seule granulométrie*

Ces expériences ont été réalisées sur des sables de granulométries 50-100 μ et 100-200 μ. Le tableau 1 indique dans la dernière colonne la variation du débit mesuré au cours de l'infiltration. Les débits diminuent au fur et à mesure que le front d'eau

avance, jusqu'à une valeur minimale et constante en régime de filtration (COURAU, 1966).

Au cours de l'infiltration de l'eau sous charge constante dans un matériau poreux, au niveau du front d'humection séparant les phases liquide, gazeuse et solide, l'eau forme des ménisques qui engendrent des forces de succion dites « capillaires » ; ces forces s'ajoutent évidemment aux forces motrices de pesanteur et de pression.

TABLEAU I

Débits d'infiltration, calculés à partir des gradients hydrauliques théoriques, et mesurés expérimentalement.

Sables 50-100 μ et 100-200 μ

Hauteur de sable (cm)	i_S théorique	i_C théorique	i total théorique	Débit théorique $q(cm^3 \cdot s^{-1})$	Débit mesuré $q(cm^3 \cdot s^{-1})$
			Sable 50-100 μ		
Infiltration	—	—	—	—	—
5	3,60	1,44	5,04	0,160 ± 0,010	0,150 ± 0,005
9	2,00	1,24	3,24	0,101 ± 0,006	0,092 ± 0,005
13	1,38	1,17	2,55	0,079 ± 0,005	0,075 ± 0,005
17	1,06	1,13	2,19	0,068 ± 0,004	0,067 ± 0,005
21	0,86	1,10	1,96	0,061 ± 0,003	0,050 ± 0,005
Filtration	0	1,10	1,10	—	0,034 ± 0,005
			Sable 100-200 μ		
Infiltration	—	—	—	—	—
5	2,40	1,44	3,88	0,35 ± 0,04	0,32 ± 0,01
9	1,30	1,24	2,54	0,23 ± 0,02	0,23 ± 0,01
13	0,92	1,17	2,09	0,19 ± 0,02	0,18 ± 0,01
17	0,70	1,13	1,83	0,16 ± 0,01	0,15 ± 0,01
21	0,57	1,10	1,67	0,15 ± 0,01	0,13 ± 0,01
Filtration	0	1,10	1,10	—	0,10 ± 0,01

i_S, gradient hydraulique dû à la succion
i_C, gradient hydraulique dû à la charge

Comme il n'y a pas de gradient d'humidité en deçà du front d'infiltration parvenu à la hauteur x du milieu, on peut considérer à chaque instant des colonnes de longueurs différentes en régime de filtration. C'est-à-dire que la loi de Darcy qui rend compte de la variation d'un débit en fonction du gradient hydraulique (ou perte de charge hydraulique par unité de longueur) est strictement applicable.

Dans ces conditions, la pression de l'eau au niveau du front d'infiltration est représentée sans erreur notable par la hauteur d'eau entre ce front d'infiltration et la surface d'eau libre. Selon la loi de Darcy, la perte de charge au niveau x atteint par le front, égale la valeur de cette hauteur d'eau. Si a est la hauteur d'eau au-dessus de la surface, la perte de charge en un point x du milieu est $(a + x)$. Le gradient hydraulique dû à la charge C est alors :

$$i_C = \frac{a + x}{x}$$

D'autre part, en l'absence du gradient d'humidité, les forces de succion s'appliquent au niveau du front uniquement, dans des directions proches de la verticale et avec une intensité relativement identique en tous les points de ce front. Ce phénomène est analogue à celui de la remontée capillaire dans ce même matériau placé au-dessus d'un plan d'eau où la valeur de la succion correspond à la hauteur capillaire.

Nous avons vérifié la validité de la loi de Darcy quand on appliquait une force de succion à la base de colonnes de sable déjà en régime de filtration, ceci par l'action d'une trompe à vide (COURAU, 1967). La figure 3 indique la variation de la succion le long de la colonne de matériau. Il apparaît une « perte de succion » selon le même processus que pour une charge, et qui, pour une même valeur, provoque un débit identique (fig. 4).

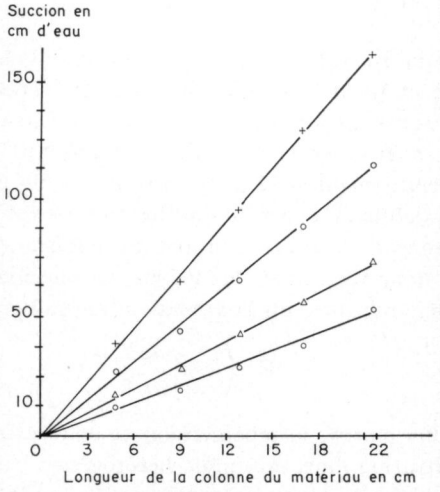


FIG. 3. — *Variation de la succion le long de la colonne de sable saturée, pour différentes succions appliquées au bas de la colonne*

Sable 50-100 μ

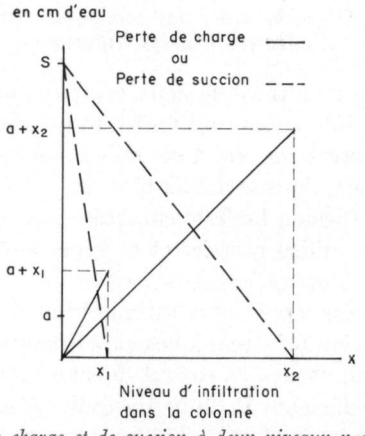


FIG. 4. — *Pertes de charge et de succion à deux niveaux x du front d'infiltration dans un matériau homogène*

Cas d'une lame d'eau de hauteur *a*,
d'un sable de succion S, soumis à la charge $(a + x)$

De même, dans le cas d'une infiltration d'eau avec un front saturé, on peut supposer un mode d'action identique de la succion au niveau du front, et ceci quelle que soit la longueur du matériau traversé. Le gradient hydraulique dû à la succion S sera en un point x de la colonne de sable :

$$i_S = \frac{S}{x};$$

étant donné que les gradients hydrauliques sont de même sens, leurs effets s'ajoutent. Le gradient total serait en x :

$$i_x = i_{Sx} + i_{Cx} = \frac{S}{x} + \frac{a+x}{x} = I + \frac{a+S}{x}$$

Le tableau 1 indique les valeurs théoriques des gradients hydrauliques dus à la charge et à la succion et les débits théoriques qui en dépendent, connaissant par ailleurs les caractéristiques géométriques du matériau (coefficient K de la loi de Darcy, $Q = K \cdot i \cdot s$, avec s, section totale du matériau). Les débits calculés et ceux mesurés expérimentalement sont en concordance suffisante.

Les différences de débits au cours de l'infiltration s'expliquent donc par l'action simultanée de la charge et de la succion propre au matériau traversé.

En conséquence, dans un milieu homogène, la succion S influence la vitesse d'infiltration V en s'introduisant dans l'expression du gradient hydraulique :

$$V_x = K \cdot \left(I + \frac{a+S}{x} \right). \qquad (1)$$

Il convient d'étudier ensuite la répercussion de ce résultat sur la compréhension des mécanismes d'infiltration dans un milieu hétérogène ; c'est pourquoi nous avons poursuivi cette étude sur des matériaux homogènes placés côte à côte, quand les forces de succion et la perméabilité diffèrent au niveau du changement de dimension des interstices.

2. *Infiltration dans des matériaux contigus de granulométries différentes*

L'eau est introduite à la surface de deux compartiments juxtaposés remplis de quartz de granulométries différentes (fig. 1). L'eau qui circule dans le milieu le plus grossier est soumise aux forces propres à ce milieu ; en particulier, la ligne du front est horizontale. Au contraire, dans le milieu plus fin, cette ligne est incurvée, mettant en évidence une force de succion latérale caractéristique du matériau fin ; elle agit sur l'eau circulant dans le milieu grossier et se superpose aux forces verticales étudiées précédemment (fig. 5 et 6).

On remarque que les espaces poreux du matériau fin sont saturés sous l'action des forces latérales de succion (cf. techniques expérimentales).

Les effets de la succion verticale peuvent devenir même négligeables suivant les valeurs respectives des coefficients K de perméabilité et de succion S. Par exemple, l'eau s'infiltre à la même vitesse dans des billes de verre de 60 μ de diamètre et des billes de 140 μ en position contiguë, alors que la vitesse entre ces deux milieux considérés isolément varie du simple au double.

On conçoit donc le rôle privilégié des interstices fins débouchant sur des canalicules de plus grande taille, sur la vitesse de saturation de l'ensemble d'un matériau homogène.

Cependant, il est difficile de définir exactement les composantes de ces forces qui permettraient d'écrire l'expression du gradient hydraulique total.

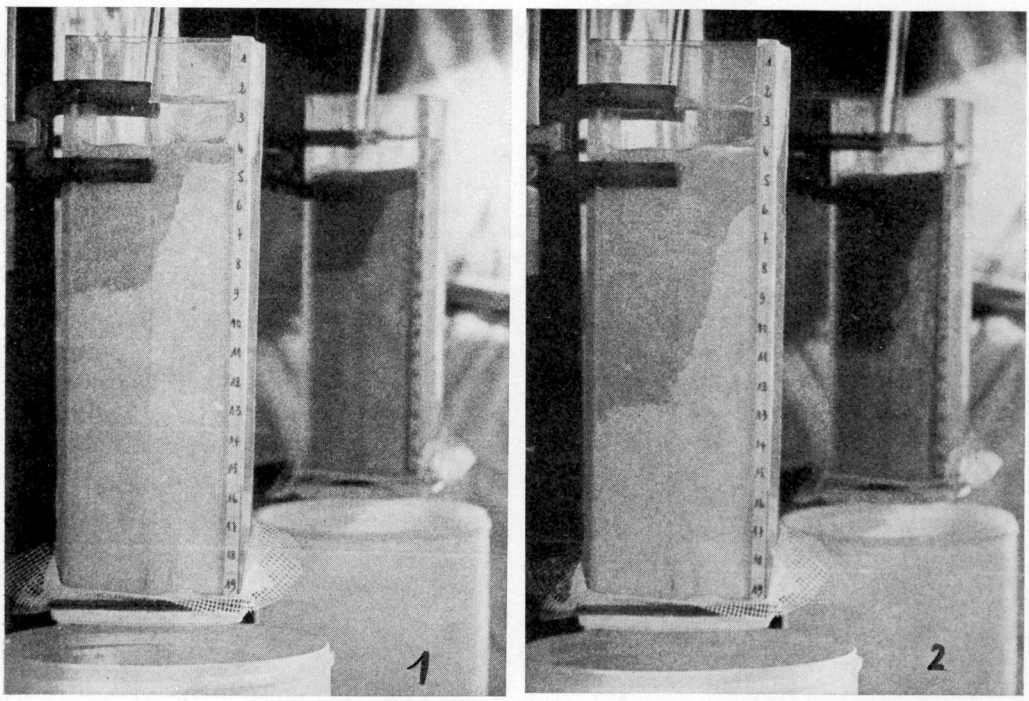


FIG. 5 et 6. — *Front d'infiltration dans des sables contigus 50-100 μ à droite et 200-500 μ à gauche, à deux niveaux de la colonne*
Vue de deux faces, la deuxième étant réfléchie dans un miroir

Dans une autre expérience sur deux granulométries en position contiguë, nous avons introduit l'eau à la surface de l'un des matériaux seulement (fig. 2).

Quand l'eau est introduite dans le matériau grossier, l'écoulement correspond à ce qui vient d'être décrit, ce qui met en évidence l'effet de la succion latérale du milieu fin. Mais si l'eau est introduite dans le milieu fin, elle ne passe pas dans le milieu grossier, puisque les forces de succion y sont plus faibles (fig. 7). Ceci démontre quantitativement l'importance des forces de succion latérale.

Ces résultats apparaissent simultanément lors de l'infiltration dans une colonne remplie de trois sables 20-50 μ (*f*), 50-100 μ (*m*), et 100-200 μ (*g*), disposés chacun selon une section angulaire de $2\pi/3$ radian. La figure 8 montre le développement des fronts d'infiltration aux temps t et t'. Rappelons que les sables sont caractérisés par leurs coefficients de perméabilité $K_g > K_m > K_f$, et leurs succions $S_g < S_m < S_f$, les vitesses d'infiltration entre *f* et *g* étant très différentes.

En comparant les fronts d'infiltration de *f* et de *m*, on remarque que celui de *f*, très en avance, ne permet pas le passage de l'eau dans *m* où la succion est trop faible.

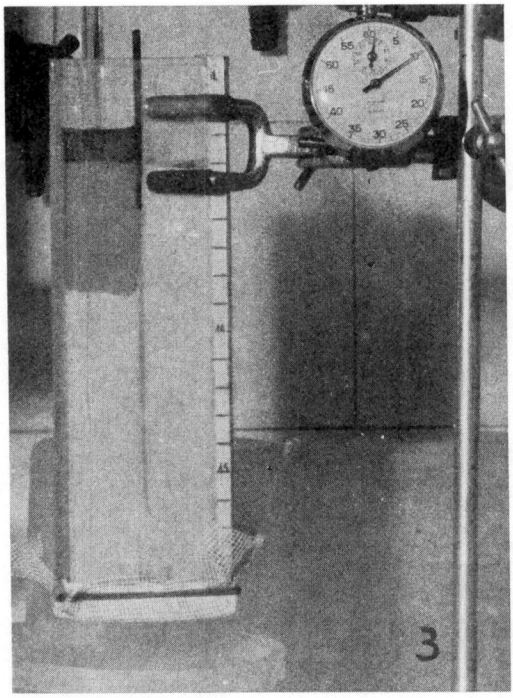


FIG. 7. — *Front d'infiltration dans des sables contigus 50-100 µ à gauche, 200-500 µ à droite, quand l'eau est introduite au-dessus du sable 50-100 µ*

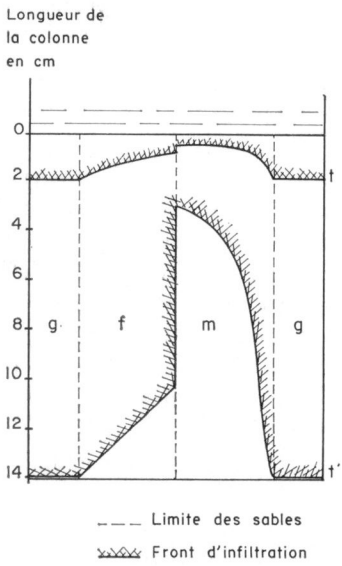


FIG. 8. — *Infiltration dans une colonne de section circulaire contenant trois séries de sables contiguës, fins* (f), *moyens* (m), *grossiers* (g)
Développement plan du front d'infiltration observé aux temps *t* et *t'*

Il en résulte que la filtration apparaît dans l'ordre suivant : matériau grossier, fin et moyen.

Ainsi, le rôle de la succion, mis en évidence en milieu isotrope ($V = f(K, S)$) se précise dans des milieux anisotropes sur la circulation latérale et verticale de l'eau.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Ainsi, l'étude des gradients hydrauliques dans des modèles où la circulation de l'eau d'infiltration suit la loi de Darcy a permis de mettre en évidence certains mécanismes de l'action de la succion, et son rôle par rapport à celui de la charge.

Tout d'abord, il apparaît nettement que de tels matériaux se comportent bien comme le prévoit la loi de Darcy, du moins pour la gamme des charges qui ont été utilisées. En d'autres termes, on peut écrire : $\frac{a + x}{x}$ comme expression de la pente motrice, x étant la hauteur de terre et a l'épaisseur de la lame d'eau surmontant l'échantillon.

Cette grandeur tend évidemment vers I quand x augmente.

Quand il s'agit d'infiltration, on peut écrire : $V = \frac{K(x + a + S)}{x}$ où a et x ont le même sens que dans la formule précédente et S représente la succion exercée par le milieu. Pour ces matériaux simples, la valeur de cette succion est sensiblement égale à la hauteur atteinte par l'eau en ascension capillaire, c'est-à-dire quand on fait plonger un tube rempli de matériaux secs dans une nappe d'eau libre.

Dans un modèle composé de deux prismes remplis chacun de matériau de granulométrie différente, mais juxtaposés, c'est-à-dire en communication, l'alimentation étant assurée par en haut, on constate que la vitesse d'infiltration est plus grande dans le milieu à grain plus gros que dans le milieu à grain plus fin. Effectivement, on sait que dans un capillaire de rayon R, la vitesse de filtration est une fonction de R^2, tandis que la vitesse due à la succion S est une fonction de $1/R$: c'est donc la vitesse de filtration qui domine. Au contact des deux matériaux se produit un phénomène supplémentaire : l'extraction de l'eau présente dans le compartiment rempli de matériaux grossiers, par les éléments fins situés dans le compartiment juxtaposé. Cet effet de succion diminue évidemment avec la distance comme le montrent les photos.

On peut alors extrapoler et étendre à un milieu hétérogène, constitué d'agrégats de terre renfermant des pores de petites tailles, et laissant entre eux des pores de grandes tailles. Au cours de l'infiltration, l'eau doit donc s'écouler préférentiellement dans les pores de grandes tailles et de là remplir la porosité interne des agrégats constitués de pores fins. Ce schéma correspond à celui proposé par FEODOROFF (1965) dans son étude sur l'infiltration. Un tel système correspond aux sols réels, et les phénomènes d'imbibition de la porosité fine se compliquent du fait de la mouillabilité plus ou moins bonne et de l'existence des phénomènes de gonflement.

Aussi, nous tenterons dans un prochain travail d'examiner les conséquences de ces divers mécanismes à l'égard de la circulation de l'eau dans des sols naturels.

Reçu pour publication en novembre 1968.

SUMMARY

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CIRCULATION OF SATURATING WATER IN ARTIFICIAL POROUS MEDIA

Darcy's law has been applied to various porous models, consisting of sands or small glass balls, with a homogeneous distributions of the size of particle and identical porosity for the same material.

This study has enabled us to determine the effect of the water load and the force of suction during infiltration, when the forces are acting vertically or laterally. Infiltration does not, accordingly, depend only on the dimensions of the individual pores, but also on their distribution, and the manner in which it ensures a continuous flow.

ZUSAMMENFASSUNG

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES UMLAUFES DES SÄTTIGUNGSWASSERS IN KÜNSTLICHEN PORÖSEN MILIEUS

Das Gesetz von Darcy wurde auf verschiedene, aus Sand oder Glaskügelchen zusammengesetzte, poröse Muster angewendet, die homogene Körnchengrössen und identische Porosität für dasselbe Material aufwiesen.

Diese Untersuchung erlaubte, die Einwirkung des Wassersdruckes und des Saugens während der Filtrierung zu bestimmen, je nach senkrechter oder seitlicher Einwirkung der Kräfte. Es wurde festgestellt, dass die Versickerung nicht nur von der Grösse der verschiedenen Poren abhängig ist, sondern auch von dem Netz, das sie bilden, indem sie die Kontinuität der Wasserführung veranlassen.

РЕЗЮМЕ

Экспериментальное изучение продвижения насыщающей влаги в искуственных пористых средах.

МАРИЕЛЬ КУРО.

В экспериментах автора, закон Дарси применялся к разным пористым моделям состоявшим из песка, или стеклянных шариков одинаковой гранулометрии и пористости.

Изучение это позволило различить влияние гидростатического давления воды и всасывающего действия во время инфильтрации, когда силы действуют в вертикальном и горизонтальном направлениях. Таким образом, инфильтрация зависит не только от размеров различных пор, но и от сети которую они образуют, способствуя последовательности истечений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COURAU M., 1966. Modalités de l'infiltration de l'eau dans des milieux de granulométries variées, et de porosité constante. *C. R. Acad. Sci.*, **263**, série D, 641-644.

COURAU M., 1967. Modalités de l'infiltration de l'eau dans un milieu poreux : effet de la force de succion. *C. R. Acad. Sci.*, **265**, série D, 862-865.

FEODOROFF A., 1965. Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. *Thèse, Ann. agron.*, **16** (2), 127-175.

Ann. agron., 1969, **20** (1), 15-34.

EFFETS ET ARRIÈRE-EFFETS SUR BLÉ D'UNE FUMURE AZOTÉE SUR *RAY-GRASS D'ITALIE*

G. LEFÈVRE, G. HIROUX

Station d'Agronomie, 23, rue Debray, 80 - Amiens
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Compte rendu d'un essai de fumure azotée sur *Ray-grass d'Italie* suivi en arrière-action sur blé. Calcul des formules de fumure donnant séparément la meilleure production du ray-grass et du blé. Conclusions tirées de la confrontation des impératifs ressortant de ces deux aspects du rôle de la fumure.

INTRODUCTION

Des essais antérieurs de fumure azotée sur Fétuque des prés et Dactyle (LEFÈVRE, HIROUX, 1965-66) ont montré que la capacité d'exportation d'azote de ces graminées fourragères ne peut être satisfaite que par des apports minéraux très importants.

En l'absence d'une fumure suffisante, les exportations dépassent parfois très largement les apports entraînant une diminution apparente des réserves du sol. L'effet subséquent de cet appauvrissement n'avait pas été mesuré directement.

Ce mémoire a pour but de présenter les résultats observés avec un *Ray-grass d'Italie* dont le potentiel élevé de productivité s'accompagne également d'exigences azotées importantes. L'étude de l'effet direct de la fumure azotée sur le *Ray-grass d'Italie* en constituera la première partie, celle de l'arrière-effet sur blé, la seconde.

I. — PRODUCTION DU « RAY-GRASS D'ITALIE »

A. — *Dispositif expérimental*

1. *Sol.*

Le sol qui a porté cet essai avait la composition suivante :

(p. 1 000)	0-20	20-40	40-60
Argile	147	171	229
Limon	291	291	293
Sables très fins	417	434	360
Sables fins	117	77	98
Sables grossiers	5	9	7
Matières organiques	22	18	12
Calcaire total	4	1,5	1,0
pH	7,3	7,3	7,1
Azote total	1,16	0,93	0,63
Acide phosphorique assimilable	0,04	0,03	0,01
Potasse échangeable	0,14	0,11	0,10

C'est un sol de limon léger, caractéristique de la région où il se trouve (Ponthieu) normalement pourvu en matières organiques et azote, très pauvre en acide phosphorique et pauvre en potasse.

2. *Fumures.*

Phosphopotassique.

La fumure phosphopotassique a été apportée sous deux formes : soit en fumure de fond aux doses de 150 P_2O_5-200 K_2O, soit avec chaque apport azoté à la dose de 60 P_2O_5-100 K_2O.

Ces modalités de fumure phosphopotassique n'ont pas donné entre elles de différences significatives. Leurs résultats sont confondus dans ce mémoire.

Azotée.

Le plan de fumure azotée devait à la fois permettre de suivre, dans toute leur amplitude, les possibilités de réponse du *Ray-grass* d'*Italie* et assurer des déficits et des excédents à chacun des cycles de végétation.

La répartition des périodes de pénurie ou d'abondance devait être laissée au hasard. Dans ce but, des apports de 0, 100, 200, 300 unités/ha ont été assurés avant le départ de végétation de chaque cycle et cela avec toutes les combinaisons possibles.

Ainsi, chaque traitement du premier cycle a reçu, avant le deuxième cycle, les quatre doses prévues. Il en a été de même pour ces quatre traitements du deuxième cycle qui sont transformés en seize combinaisons pour le troisième cycle.

L'ensemble représente 64 types de fumure.

Étant donné le nombre de ces traitements, les dernières formules n'étaient répétées que deux fois mais correspondaient à huit répétitions sur le cycle précédent et à seize répétitions sur le premier cycle.

Chaque formule du traitement est repérée par un nombre de trois chiffres :

le chiffre des centaines, représentant la dose de fumure apportée avant le premier cycle ;
le chiffre des dizaines, représentant la dose de fumure apportée avant le deuxième cycle ;
le chiffre des unités, représentant la dose de fumure apportée avant le troisième cycle.

Ainsi, la formule 312 correspond à une fumure totale de $(3 + 1 + 2) \times 100$, soit 600 unités/ha répartie en 300 unités avant le premier cycle, 100 avant le deuxième, et 200 avant le troisième.

Les apports azotés ont été effectués les 16 février, 8 juin, 25 juillet.

3. *Récoltes.*

Les coupes ont été effectuées les 31 mai, 1er juin, 18 juillet et 28 août.

Entre le 1er juin et le 18 juillet, il a plu 100,3 mm, entre le 18 juillet et le 28 août, 102,1 mm.

B. — *Mesures*

La production de matière verte de chaque parcelle a été mesurée sur place, immédiatement après la coupe.

Un échantillon a été prélevé pour la détermination de l'humidité, en vue de calculer la production de matière sèche correspondante. Seul, le « rendement » en sec figure dans ce mémoire.

La teneur en azote total a été déterminée sur ces mêmes échantillons afin de calculer l'exportation d'azote liée à chaque traitement. Cette valeur n'est pas reportée ici mais elle apparaîtra sous la forme de « résidu azoté apparent », différence entre l'exportation de chaque cycle et l'apport le précédant.

C. — *Résultats*

Le tableau 1 donne les productions totales de matière sèche fournies par les trois coupes. Elles sont réparties dans des classes croissantes de deux en deux tonnes.

Dans chaque classe, il y a cinq colonnes : la première représente la formule de fumure ayant donné la production totale, notée dans la seconde et dont la répartition par coupe est faite dans les trois colonnes suivantes.

La multiplicité des formules ne permet pas de saisir immédiatement l'influence individuelle du niveau de fumure de chaque cycle (sauf dans les deux premières classes où l'on trouve quinze des seize formules ne comportant pas d'azote avant le 1er cycle). Les résultats expérimentaux peuvent également présenter quelques anomalies mais leur nombre est suffisant pour que l'on puisse discuter sur les moyennes qui figurent en bas du tableau.

1. *Répartition de la production entre les divers cycles de végétation* (fig. 1).

La figure 1 indique, pour chaque classe de rendement, les productions moyennes correspondantes de chaque cycle.

Les tonnages individuels montrent l'importance de la contribution des deux premiers cycles.

Leur somme fournit une courbe à peu près parallèle à la production totale indiquant la faible intervention relative du niveau de fumure réalisé sur le dernier cycle.

2. *Fumures azotées « moyennes » correspondant aux différentes classes* (fig. 2).

Le tableau 1 rend compte de la diversité apparente des formules ayant donné, dans chaque classe, des « rendements » à peu près équivalents. Leur moyenne donne une meilleure approche de la fumure probable fournissant la répartition de production la meilleure.

La figure 2 indique :

1° l'importance du rôle joué par la fumure du premier cycle ;

2° l'influence encore marquée de la fumure du deuxième cycle. La classe 10-12 t se différencie essentiellement de la classe inférieure à 10 t par la dose d'azote fournie avant ce deuxième cycle ;

TABLEAU I

Influence de la dose et de la répartition de la fumure azotée sur la production du Ray-grass d'Italie

matière sèche t/ha

Classes de rendement	< 10 t/ha				
Somme des fumures des 1er et 2e cycles	Formule de la fumure	Matière sèche			
		totale	1er cycle	2e cycle	3e cycle
000	000	6,82	2,13	3,35	1,34
	001	8,66	1,63	3,46	3,57
	003	8,64	1,66	3,37	3,61
100	010	9,08	1,58	5,07	2,43
	012	9,95	1,72	4,74	3,49
	100	9,54	4,92	3,08	1,54
200					
300					
400					
500					
600					
Sommes	1 2 6	52,69	13,64	23,07	15,98
Nombre de cas	6				
Fumures et productions moyennes					
1er cycle	16		2,28		
2e cycle	33			3,85	
3e cycle	100				2,65
1 + 2	49			6,13	
1 + 2 + 3	149	8,78			

TABLEAU I (*suite*)

Classes de rendement	10-12 t/ha				
Somme des fumures des 1er et 2e cycles	Formule de la fumure	Matière sèche			
		totale	1er cycle	2e cycle	3e cycle
000	002	10,09	2,30	4,03	3,76
100	011	11,52	2,00	5,92	3,60
	013	10,00	1,71	4,74	3,55
200	020	11,85	2,25	5,66	3,94
	022	11,70	1,72	5,83	4,15
	023	11,85	2,13	5,88	3,84
300	030	10,66	2,06	5,11	3,49
	031	10,91	2,12	4,70	4,09
	032	10,51	1,80	5,67	3,04
	033	10,15	1,86	5,53	2,76
400					
500					
600					
Sommes	0 20 17	109,24	19,95	53,07	36,22
Nombre de cas	10				
Fumures et productions moyennes					
1er cycle	0		1,99		
2e cycle	200			5,31	
3e cycle	170				3,62
1 + 2	200			7,30	
1 + 2 + 3	370	10,92			

TABLEAU I (*suite*)

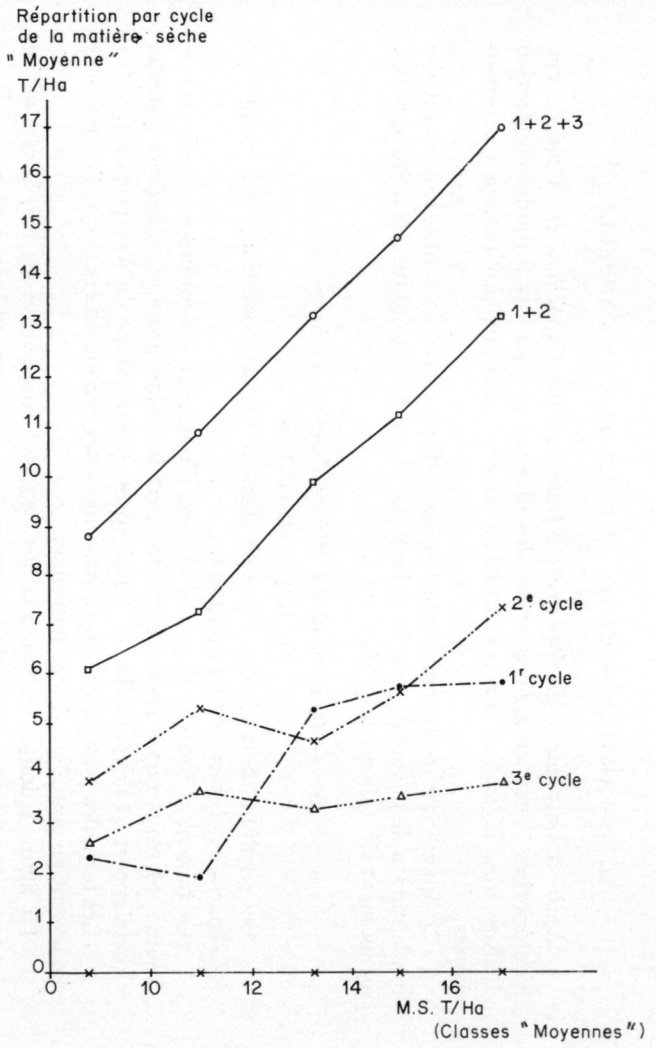
Classes de rendement	12-14 t/ha				
Somme des fumures des 1er et 2e cycles	Formule de la fumure	Matière sèche			
		totale	1er cycle	2e cycle	3e cycle
000					
100	101	13,37	6,54	3,05	3,78
	102	12,64	5,58	3,31	3,75
	103	12,39	6,00	2,75	3,64
200	(021)	13,35	1,62	8,31	3,42
	110	13,42	5,20	5,77	2,45
	201	13,93	5,67	4,63	3,63
	203	12,09	5,71	2,89	3,49
300	120	13,86	5,46	5,11	3,29
	121	13,72	5,89	4,81	3,02
	210	12,19	5,17	4,56	2,46
	302	13,43	4,76	5,40	3,27
	303	13,57	5,51	4,85	3,21
400	(313)	13,12	5,69	4,02	3,41
500	230	13,83	5,27	5,28	3,28
	233	13,73	6,13	4,21	3,39
600	330	13,34	5,32	4,50	3,52
Sommes	28 18 23	211,98	85,52	73,45	53,01
Nombre de cas	16				
Fumures et productions moyennes					
1er cycle	175		5,34		
2e cycle	112			4,59	
3e cycle	144				3,32
1 + 2	287			9,93	
1 + 2 + 3	431	13,25			

TABLEAU I (*suite*)

Classes de rendement	14-16 t/ha				
Somme des fumures des 1er et 2e cycles	Formule de la fumure	Matière sèche			
		totale	1er cycle	2e cycle	3e cycle
000					
100					
200	111	15,31	6,48	4,82	4,01
	112	15,88	6,05	5,67	4,16
	113	14,10	5,98	4,90	3,22
	200	14,27	5,94	6,23	2,10
	202	14,67	5,84	4,30	4,53
300	122	14,17	4,69	5,75	3,73
	123	15,21	6,85	5,46	2,90
	212	15,25	5,34	5,87	4,04
	213	14,60	5,57	5,75	3,28
	300	14,18	5,22	6,06	2,90
	301	14,69	5,66	5,48	3,55
400	130	14,40	5,24	6,01	3,15
	131	15,50	5,03	6,83	3,64
	132	14,10	6,15	4,68	3,27
	133	15,81	5,88	6,09	3,84
	221	14,83	5,95	5,46	3,42
	222	15,96	6,01	6,68	3,27
	223	14,29	5,33	5,85	3,11
	310	14,46	5,66	5,02	3,78
	312	14,08	5,19	5,61	3,28
500	231	15,62	6,52	5,57	3,53
	232	15,68	5,69	5,83	4,16
	320	14,44	4,97	5,65	3,82
	321	15,91	6,76	5,37	3,78
	322	14,45	5,78	5,43	3,24
	323	15,22	6,05	5,66	3,51
600	332	14,80	5,22	5,73	3,85
	333	14,00	5,28	6,02	2,70
Sommes	57 49 47	415,88	160,33	157,78	97,77
Nombre de cas	28				
Fumures et productions moyennes					
1er cycle	207		5,72		
2e cycle	175			5,63	
3e cycle	168				3,50
1 + 2	382			11,35	
1 + 2 + 3	550	14,85			

TABLEAU I (*suite*)

Classes de rendement	> 16 t/ha				
Somme des fumures des 1er et 2e cycles	Formule de la fumure	Matière sèche			
		totale	1er cycle	2e cycle	3e cycle
000					
100					
200					
300	211	17,23	5,69	7,40	4,14
400	220	16,64	6,31	6,44	3,89
	311	17,65	5,46	8,78	3,41
500					
600	331	16,55	5,78	7,07	3,70
Sommes	10 7 3	68,07	23,24	29,69	15,14
Nombre de cas	4				
Fumures et productions moyennes					
1er cycle	250		5,81		
2e cycle	175			7,42	
3e cycle	75				3,79
1 + 2	425			13,23	
1 + 2 + 3	500	17,02			



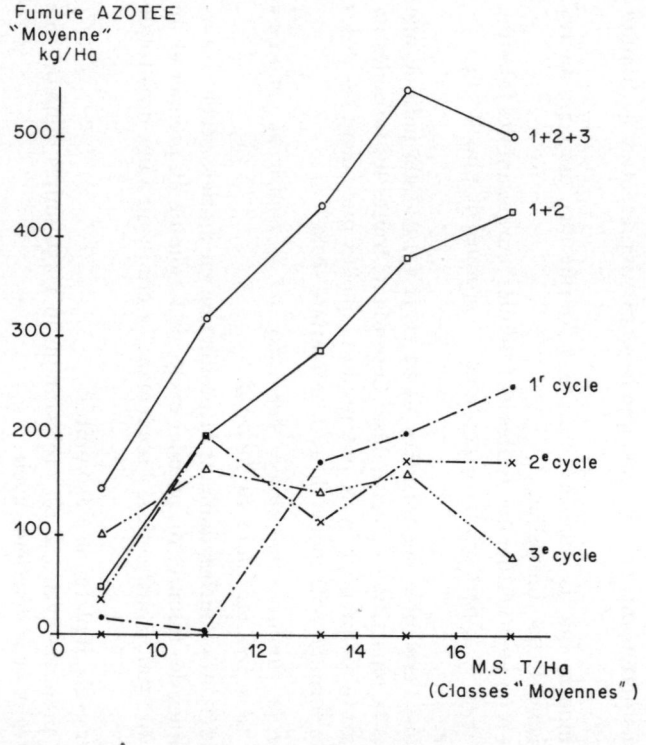


FIG. 2. — *Répartition, par coupe, de la fumure moyenne en fonction de la production totale de matière sèche*

FIG. 1. — *Tonnage moyen de matière sèche fourni par chaque cycle de végétation du* Ray-grass d'Italie *en fonction de la production totale calculée elle-même comme moyenne de classes croissantes de deux en deux tonnes*

3° la progression de la somme des fumures apportées aux 1er et 2e cycles, en fonction du rendement en matière sèche, pourrait être grossièrement assimilée à une droite, beaucoup plus nettement, en tous cas, que la courbe représentant la fumure totale.

Cet ensemble montre que la quantité d'azote à fournir aux deux premières coupes doit être voisine de 400 unités/ha.

Dans le tableau 1, on peut vérifier que toutes les formules fournissant des fumures supérieures à cette dose — à part quatre exceptions — produisent plus de 14 t de matière sèche à l'ha.

On retrouve ainsi l'ensemble des formules 13-22 et 31 (313). Cela indique une certaine liberté dans la répartition de cette dose. Cependant, toutes les formules ne comprenant pas d'azote au premier cycle ont produit, quelles que soient les doses ultérieures (à part la formule 021) moins de 12 t de matière sèche.

3. *La liaison entre la fumure « moyenne » par classe et le rendement « moyen » de chaque classe est représentée dans la figure 3.*

L'allure des différentes courbes donnant la production en matière sèche correspondant aux moyennes des fumures du premier cycle, de la somme du premier et du deuxième cycle, et du total, montre que le « rendement » a crû jusqu'à une dose totale de 500 unités.

Pour le premier cycle, il plafonne à 250 unités.

Pour les deux premiers cycles, il est croissant jusqu'à 450 unités donnant une fumure de 200 unités pour le deuxième cycle.

La fumure du dernier cycle ressort ainsi à 50 unités.

Les formules les plus approchées dans notre expérience sont 220 et 311.

II. — ARRIÈRE-ACTION SUR LE BLÉ (« CAPPELLE »)

Après retournement du *Ray-grass d'Italie*, un blé *Cappelle* a été semé en vue d'extérioriser l'effet, en arrière-action, des différences dues aux formules d'entretien du *Ray-grass d'Italie* et aux exportations azotées liées aux productions correspondantes.

Craignant que cette manifestation ne soit perturbée par une trop mauvaise implantation de la céréale, une dose uniforme d'azote de 30 unités/ha a été apportée au moment du tallage, le 7 mars 1967.

A. — *Rendement du Blé en fonction de la fumure du* Ray-grass d'Italie

Les résultats de la récolte, effectuée dans de bonnes conditions, le 28 août, ont été séparés en classes de cinq quintaux.

Le tableau 2 fournit, dans ces classes, d'une part les formules antérieures de fumure du *Ray-grass d'Italie* et d'autre part le résidu azoté — différence calculée entre l'apport et l'exportation — laissé après chaque coupe du *Ray-grass d'Italie*.

Les formules font encore apparaître une assez grande diversité que l'on a traitée également en considérant leur moyenne.

La figure 4 donne, en fonction des classes de rendement du blé, la répartition des fumures « moyennes » antérieures apportées à chaque cycle du *Ray-grass d'Italie*.

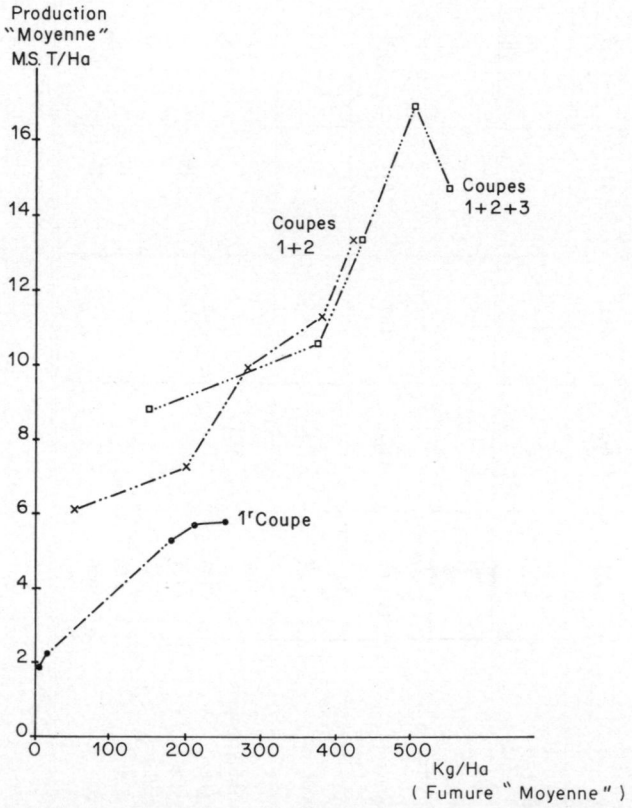


FIG. 3. — *Production moyenne de matière sèche du* Ray-grass d'Italie *en fonction de fumures moyennes appliquées au premier cycle, aux deux premiers cycles, et au total*

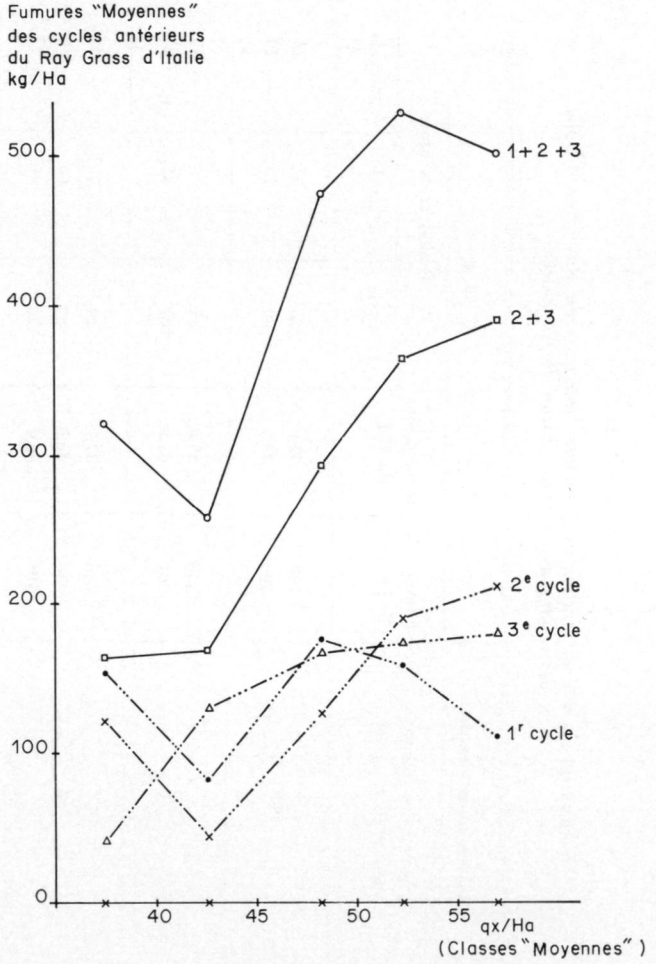


FIG. 4. — *Fumure moyenne fournie à chaque cycle de végétation du* Ray-grass d'Italie *et à leur somme correspondant aux rendements moyens du blé lui succédant* ⟶

TABLEAU 2

Rendements du Blé en fonction de la fumure antérieure du Ray-grass d'Italie *et des résidus azotés après chacun de ses cycles*

Classes de rendement	< 40 q				
Somme des fumures des 2e et 3e cycles	Formule de la fumure	Rendements du Blé	Résidu azoté après		
			1er cycle	2e cycle	3e cycle
000	100	37,0	23	— 32	— 21
	200	32,5	80	— 75	— 29
100	110	39,8	34	+ 8	— 39
	201	34,8	101	— 85	24
200	020	37,7	— 29	70	— 63
	220	36,0	83	65	— 82
	102	39,0	26	— 36	97
300	230	38,0	104	183	— 79
400	331	39,6	135	214	— 9
500					
600					
Sommes	14 11 4	334,4	557	312	— 201
Nombre de cas	9				
Fumures et résidus moyens		37,1			
1er cycle	155		62		
2e cycle	121			35	
3e cycle	44				— 22
2 + 3	165			13	
1 + 2 + 3	320			75	

TABLEAU 2 (*suite*)

Classes de rendement	40-45 q				
Somme des fumures des 2e et 3e cycles	Formule de la fumure	Rendements du Blé	Résidu azoté après		
			1er cycle	2e cycle	3e cycle
000					
100	010	44,1	— 22	5	— 40
	001	41,5	— 24	— 36	+ 32
	301	43,7	153	— 83	33
200	120	42,4	25	115	— 58
	002	40,1	— 33	— 64	108
	202	44,4	66	— 52	103
300	003	41,2	— 21	— 37	202
400					
500					
600					
Sommes	6 3 9	297,4	144	— 152	380
Nombre de cas	7	42,5			
Fumures et résidus moyens					
1er cycle	86		21		
2e cycle	43			— 22	
3e cycle	129				54
2 + 3	172			32	
1 + 2 + 3	258			53	

TABLEAU 2 (*suite*)

Classes de rendement		45-50 q			
Somme des fumures des 2e et 3e cycles	Formule de la fumure	Rendements du Blé	Résidu azoté après		
			1er cycle	2e cycle	3e cycle
000	000	48,3	— 30	— 37	— 21
	300	45,6	157	— 95	— 43
100	210	49.4	96	4	— 34
200	011	49,4	— 27	15	6
	111	49,0	16	— 1	16
	211	45,4	87	— 59	12
	302	47,3	+ 151	— 76	116
300	330	45,0	165	199	— 97
	012	48,7	— 22	28	107
	103	46,0	18	— 27	192
	203	45,6	72	— 56	210
	303	49,4	159	— 92	208
400	231	48,6	80	176	4
	313	48,3	149	11	196
500	132	45,6	11	193	106
	232	49,4	58	197	87
	123	49,0	— 7	116	201
600	333	46,4	156	171	212
Sommes	32 23 30	856,4	1 289	667	1 478
Nombre de cas	18				
Fumures et résidus moyens		47,6			
1er cycle	178		72		
2e cycle	128			37	
3e cycle	167				82
2 + 3	295			119	
1 + 2 + 3	473			191	

TABLEAU 2 (*suite*)

Classes de rendement	50-55 q				
Somme des fumures des 2e et 3e cycles	Formule de la fumure	Rendements du Blé	Résidu azoté après		
			1er cycle	2e cycle	3e cycle
000					
100	310	51,4	159	— 6	— 72
	101	52,5	12	— 34	41
200	320	50,2	154	78	— 81
300	130	55,0	24	167	— 71
	021	52,3	— 20	39	17
	121	52,7	24	112	26
	221	50,6	69	80	4
	321	52,1	125	82	7
	212	54,8	86	4	92
	312	53,8	152	— 32	103
400	122	50,4	37	95	91
	222	51,0	78	52	103
	322	54,0	163	78	117
	113	51,6	8	10	203
	213	50,8	106	6	201
500	032	51,3	— 26	192	111
	223	50,6	78	88	211
600	033	54,8	— 27	185	215
	133	51,6	17	171	185
	233	52,5	75	207	186
Sommes	33 38 35	1 044,0	1 294	1 574	1 689
Nombre de cas	20				
Fumures et résidus moyens		52,2			
1er cycle	165		65		
2e cycle	190			79	
3e cycle	175				84
2 + 3	365			163	
1 + 2 + 3	530			228	

TABLEAU 2 (*suite*)

Classes de rendement	> 55 q				
Somme des fumures des 2e et 3e cycles	Formule de la fumure	Rendements du Blé	Résidu azoté après		
			1er cycle	2e cycle	3e cycle
000					
100					
200	311	56,0	133	— 55	25
300	030	57,4	— 28	182	— 82
	112	58,1	8	8	93
400	031	55,2	— 26	191	17
	131	56,7	24	150	— 1
	022	57,0	— 24	85	80
	013	58,3	— 23	6	183
500	332	55,8	158	156	86
	023	57,9	— 27	101	196
	323	56,4	156	83	196
600					
Sommes	11 21 18	568,8	351	907	793
Nombre de cas	10				
Fumures et résidus moyens		56,9			
1er cycle	110		35		
2e cycle	210			91	
3e cycle	180				79
2 + 3	390			170	
1 + 2 + 3	500			205	

On peut y voir que la moyenne de fumure avant le premier cycle se répartit d'une manière quelconque sans relation avec le rendement du blé. Par contre, les fumures avant le deuxième cycle décrivent une courbe nettement ascendante à partir de la deuxième classe de rendement du blé. Treize sur seize des formules comportant une fumure de 200 unités au deuxième cycle donnent les rendements supérieurs à 50 q.

Les doses moyennes fournies avant le troisième cycle se situent sur une courbe encore plus liée au rendement quoique plus curviligne.

Il apparaît donc ici, en fonction des données culturales de cette expérience, que ce sont les fumures précédant les deuxième et troisième cycles qui ont eu une influence sur le « rendement » ultérieur du blé. Par contre, la fumure totale du *Ray-grass d'Italie* ne correspond pas au classement de la production du blé.

B. — *Rendements du Blé en fonction des résidus azotés*

Connaissant les exportations azotées de chaque traitement, il est facile de calculer le résidu azoté apparent. Ce calcul n'a un sens que dans le cas d'une exploitation

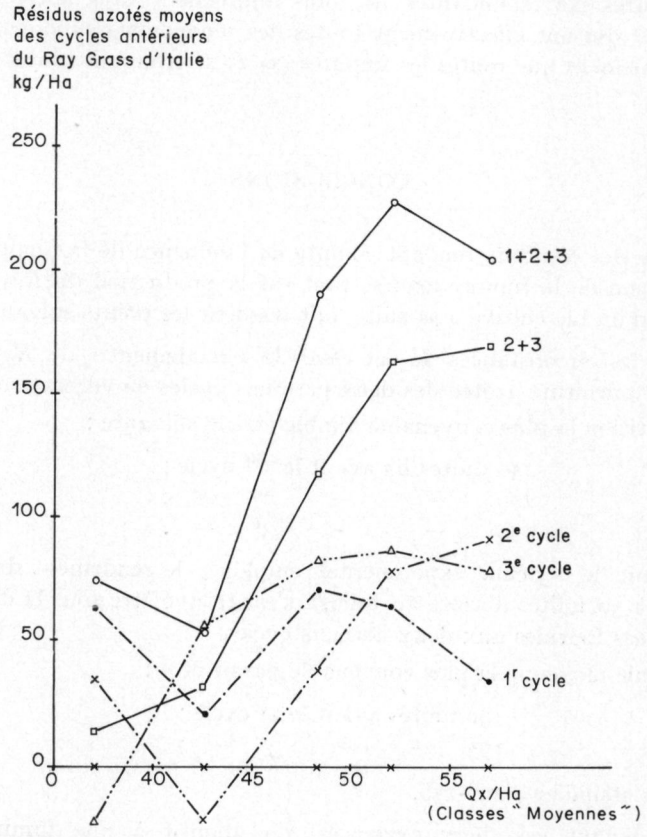


FIG. 5. — *Résidus azotés moyens, laissés après chaque cycle de végétation du* Ray-grass d'Italie *et rendement moyen du Blé lui succédant*

intensive du sol par les racines des végétaux comme cela se passe pour les prairies. Il est en effet très rare de trouver de l'azote minéral dans des sols ainsi « couverts ». D'autre part, le développement végétatif permet une bonne distribution des pluies au sol, et une consommation importante en eau est liée à la production végétale.

Ces deux faits limitent encore les risques d'entraînement par lessivage. Il y a donc, dans ce cas, de fortes probabilités que l'azote résiduel soit effectivement conservé dans la zone radiculaire.

La figure 5 reporte, en fonction des classes de rendement du blé, les valeurs moyennes des résidus azotés correspondants, et cela pour chaque cycle du *Ray-grass d'Italie*.

L'aspect général de ces courbes confirme les résultats précédents et justifie l'importance que présentent les résidus des deuxième et troisième cycles et de leur somme.

Leur influence est particulièrement nette lorsqu'on passe de la classe 40 à 45 q à la classe 50-55 q pour s'atténuer ensuite. Le plafond obtenu avec la classe 50-55 q correspond à une fumure (fig. 4) azotée des deux derniers cycles de 365 kg/ha se répartissant en 190 au deuxième cycle et 175 au troisième cycle.

Les fumures correspondantes les plus approchées dans notre essai sont les fumures (x) 22 qui ont effectivement toutes des rendements supérieurs à 50 q. On doit noter également que toutes les fumures (x) 21 se trouvent toutes dans la classe 50-55 q.

CONCLUSIONS

L'analyse des résultats rendant compte de l'influence de la quantité globale et de la répartition de la fumure azotée, tant sur la production du *Ray-grass d'Italie* que sur celle d'un blé cultivé à sa suite, fait ressortir les points suivants :

1° Dans les circonstances de cet essai, le « rendement » du *Ray-gras d'Italie* dépend de la fourniture azotée des deux premiers cycles de végétation.

La répartition la plus convenable semble être la suivante :

250 unités/ha avant le 1er cycle ;
200 — — 2e — ;
50 — — 3e — .

2° Suivant le schéma expérimental employé, le rendement du blé recevant uniformément 30 unités d'azote au tallage s'est trouvé être sous la dépendance des fumures azotées fournies aux deux derniers cycles.

La formule moyenne la plus convenable paraît être :

190 unités avant le 2e cycle ;
175 — — 3e — ;

que l'on peut assimiler à 200-150.

En combinant ces deux exigences, on aboutit à une fumure globale de 600 unités/ha.

L'importance de cette fumure pourrait effrayer certains. On peut encore la justifier par les deux remarques suivantes :

a) les exportations aériennes moyennes représentent, dans ces fumures équilibrées, plus de la moitié de l'apport. La formule 321, prise comme exemple d'un apport de 600 unités/ha a entraîné l'exportation de 375 kg d'azote. Cet azote doit se retrouver à 75 p. 100 dans les fumiers et est, par cet intermédiaire, remis dans le circuit de fumure de l'exploitation ;

b) la fumure fournie en troisième cycle, excédentaire par rapport aux exigences du *Ray-grass d'Italie*, ne représente qu'une avance faite à la culture suivante, avance qui, à la rigueur, pourrait être remplacée par un excédent de fumure fournie au blé.

La fumure du *Ray-grass d'Italie* peut, dans ces conditions, être prise comme un exemple excellent de la motivation des principes réglant la fumure individuelle d'une culture qui, comme les autres, ne doit pas être exclue de la rotation à laquelle elle participe.

Reçu pour publication en octobre 1968.

REMERCIEMENTS

Nous remercions très vivement M. DELABRE, agriculteur à Fieffes, qui nous a permis de réaliser cet essai en collaboration avec M. VASSE, conseiller technique de la Chambre d'Agriculture de la Somme et M. ADMONT, ingénieur du S. P. I. E. A. à Lille.

SUMMARY

EFFECTS AND POST-EFFECTS UPON WHEAT OF A NITROGEN FERTILIZATION WITH « ITALIAN RYE-GRASS »

The run-of-the-mill fertilizer that makes for a high percentage of dry matter in *Italian ray-grass* has been calculated by the summation of the rather diversified formulae that provide a maximum yield (table 1).

It corresponds to yields in the neighbourhood of 250 kg/ha in a first cycle and 200 in a second cycle (fig. 2 and 3).

The post-effect measured on wheat brings out the influence of the fertilization carried to the second and third cycles (table 2 and fig. 4). This effect has been compared with the nitrogen residues left after each cycle (fig. 5).

The juxtaposition of these factors gives an example of the value of planned fertilization considering both the needs of the crop and its place in the rotation.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG UND NACHWIRKUNG AUF WEIZEN AUF « ITALIENISCHEM RAYGRASS » DURCHGEFÜHRTE STICKSTOFFDÜNGUNG

Die mittelmässige Dingung mit welcher das *italienische Raygrass* imstande ist, hohe Errtäge an Trockenmasse zu liefern, wurde durch das Summieren der ziemlich verschiedenen Formeln gerechnet, die zu einem maximalen Ertrag führen (Abb. 1).

Sie entspricht Zufuhren von ungefähr 250 kg/ha in dem ersten Zyklus und von 200 in dem zweiten Zyklus (fig. 2 und 3).

Die auf Weizen gerechnete Nachwirkung unterstreicht die Einwirkung der Düngerzufuhren bei dem zweiten und dritten Zyklen (Abb. 2 und Figur 4). Diese Einwirkung wurde mit den nach jedem Zyklus verlassenen Stickstoffrüchstände (Figur 5).

Die Nachbarschaft dieser Imparativen nachweisst die Wichtigkeit, die Düngung nicht nur in Abhängigkeit von der einzelnen Bedürfnisse des Anbaues, aber auch von ihrer Stelle in der Fruchtfolge zu plannen.

РЕЗЮМЕ

Действие и после-действие на пшеницу азотного удобрения внесенного под итальянский райграс.

Г. ЛЕФЭВР, Г. ХИРУ.

С помощью суммирования различных формул вызывавших максимальную продукцию, авторы вычислили среднее количество азотного удобрения дающее возможность получить повышенную продукцию сухого вещества у итальянского райграса (Таблица I).

Это количество представляет около 250 кг./га. внесенных в течении первого цикла, и около 200 кг./га. во втором (Рис. 2 и 3).

После-действие наблюдавшееся на пшенице указывает на влияние удобрений внесенных в течении 2-го и 3-го циклов (Таблица II, Рис. 4) и авторы сравнивают его, по окончании каждого цикла, с действием остаточного азота (Рис. 5). Сопоставление всех полученных данных указывает на интерес планификации внесения удобрений, как в смысле индивидуальных потребностей каждой отдельной культуры, так и в отношении места занимаемого этой культурой в севообороте.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LEFÈVRE G., HIROUX G., 1965. Essai d'interprétation de l'utilisation de l'azote par une prairie temporaire (Fétuque des prés). Conséquences pour la fumure. *Ann. agron.*, **16** (2), 203-221.

LEFÈVRE G., HIROUX G., 1966. Bilan azoté d'une culture fourragère. *C. R. Acad. Agric.*, 963-70.

Ann. agron., 1969, **20** (1), 35-59.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE MILIEU SUR LA RÉPARTITION DE L'AZOTE DANS LE SOL

II. — Acides aminés extraits par hydrolyse [1]

J. DECAU

avec la collaboration technique de B. Pujol

Station d'Agronomie et d'Œnologie,
67, Boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La répartition des acides aminés extraits de divers sols par hydrolyse présente, à côté d'une uniformité d'ensemble, des écarts particuliers importants qui dépendent des conditions pédoclimatiques et culturales des milieux étudiés.

Les différences notées proviennent de l'action variable de ces conditions sur le niveau humique, sur la nature des matières organiques et sur diverses phases de la dynamique des acides aminés du sol.

I. — INTRODUCTION

Dans un travail exposé précédemment (Decau, 1968), nous avons étudié, à partir d'une série de sols, l'influence des conditions pédoclimatiques et culturales sur la répartition des principales formes d'azote obtenues par hydrolyse et les mécanismes par lesquels ces conditions interviennent dans la distribution et la dynamique de ces fractions azotées.

Le travail que nous exposons ici prolonge et complète le précédent : après avoir analysé les fluctuations de l'azote aminé, ammoniacal et insoluble, nous avons consi-

(1) La présente étude résume la deuxième partie d'une Thèse de Doctorat ès Sciences naturelles qui a été soutenue en 1967 à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand où elle est enregistrée sous le numéro E. 74. La première partie de cette étude a paru dans le nº 6/1968 des Annales agronomiques

déré les variations particulières des principaux composants de l'azote aminé, les acides aminés.

Certes, diverses études analytiques relatives à ces composés ont déjà été réalisées, mais seul un très petit nombre d'entre elles (STEVENSON, 1956 ; CARLES, SOUBIÈS et GADET, 1958) a permis de juger, dans quelques cas particuliers, de l'influence des conditions de milieu sur la distribution des acides aminés.

Notre but a donc été, comme dans notre précédente étude, de tenter de relier, grâce à une plus vaste analyse, la répartition des acides aminés aux conditions dans lesquelles ces composés se forment et évoluent, afin d'apporter des éléments nouveaux contribuant à la connaissance du métabolisme des acides aminés dans le sol.

II. — TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET MILIEUX ÉTUDIÉS

A. — TECHNIQUES ANALYTIQUES

La première phase de nos analyses a été l'extraction par hydrolyse des acides aminés du sol. L'étude ultérieure qualitative et quantitative des acides aminés a nécessité la déminéralisation préalable de l'extrait chlorhydrique puis l'estimation globale des acides aminés contenus, enfin l'emploi de techniques chromatographiques et électrophorétiques en vue de séparer, d'identifier et de doser ces composés.

1. *Hydrolyse*

Les milieux étudiés ont été soumis à l'hydrolyse chlorhydrique et les hydrolysats obtenus ont été filtrés dans les conditions décrites dans la précédente étude (DECAU, 1968). Une partie aliquote de l'hydrolysat (50 ml, correspondant à 2 g de sol) a été évaporée à faible température (40-50°C) puis reprise à l'eau et évaporée de nouveau ; ce traitement a été renouvelé deux fois afin de bien chasser l'acide chlorhydrique.

2. *Déminéralisation*

Afin d'éliminer les matières minérales dissoutes au cours de l'hydrolyse, matières qui gêneraient lors de la séparation et du dosage des acides aminés, l'extrait sec est mis en suspension dans l'eau et placé au contact de 25 g de résine Dowex 50 × 4, forme H ; la résine est ensuite lavée à l'eau puis éluée avec 200 ml d'ammoniaque 2 N.

L'éluat ammoniacal renferme les acides aminés mais aussi de l'aluminium qui, étant donné le caractère amphotère de cet ion, n'a pu être éliminé par ce traitement.

Après avoir noté que la présence d'aluminium gêne dans la séparation et dans le dosage des acides aminés, nous avons cherché à extraire cet ion du mélange d'acides aminés à analyser.

Divers essais d'élimination, entrepris avant passage sur colonne, ont montré qu'il se produit par ces techniques une perte importante d'acides aminés acides. De ce fait, nous avons cherché à éliminer l'aluminium après élution. Mettant à profit la faible solubilité de l'alumine, une fois séchée, et son très faible pouvoir de rétention vis-à-vis des acides aminés, en milieu alcalin, nous avons employé la technique suivante : l'éluat ammoniacal est évaporé à sec à basse température puis repris par 20 ml d'ammoniaque 2 N ; après mise en suspension de l'alumine formée, le liquide est centrifugé et 15 ml de surnageant sont recueillis pour l'analyse.

3. *Estimation colorimétrique globale*

Afin de placer sur les chromatogrammes et les électrophorégrammes des quantités voisines de chacun des mélanges à fractionner, on a procédé à une estimation préalable de la quantité d'acides aminés contenue dans les éluats ammoniacaux.

50 µl de surnageant sont prélevés et placés sur une feuille de papier à chromatographie Arches 304. Après étalement puis dessiccation de la tache, la feuille est plongée dans une solution de ninhydrine à 1 pour cent dans l'alcool puis placée en étuve ventilée, à 80°C, pendant 30 minutes. Le papier portant

le complexe coloré formé est ensuite découpé et introduit dans un tube à essai contenant 7 ml d'alcool au demi. Puis le tube est placé à l'obscurité et agité de façon douce et intermittente. Au bout de 2 heures, le complexe coloré, élué du papier, se trouve dissous dans la solution hydroalcoolique. L'intensité de la coloration obtenue est alors mesurée en lumière monochromatique ($\lambda = 570$ mμ) et comparée à l'intensité de la couleur produite par un acide aminé de référence, l'acide glutamique.

4. *Séparation et dosages par électrophorèse et par chromatographie*

Une séparation par électrophorèse est tout d'abord réalisée pour déterminer les proportions relatives d'acides aminés acides, neutres et basiques, suivant la technique de BISERTE et *al.* (1960).

Les mêmes échantillons sont ensuite étudiés par chromatographie sur papier : 150 μg d'acides aminés sont déposés sur des feuilles de papier Arches 304 de 42 × 48 cm, en un point I (fig. 1) situé à 7,5 cm d'une des largeurs des feuilles (côté AD) et à 13,5 cm d'une des longueurs (côté AB). 20 μl d'une solution-témoin contenant 20 μg d'acide γ-aminobutyrique, 20 μg de valine et 20 μg de leucine sont aussi déposés sur le chromatogramme, en un point J distant de AB et de AD de 2,5 et de 7,5 cm respectivement. 3 étalons internes sont aussi placés sur le chromatogramme : avant le développement, 20 μg d'alanine et 20 μg d'acide aspartique sont déposés respectivement aux points L et M (fig. 1) ; après le passage du premier solvant, 20 μg d'alanine sont déposés au point K.

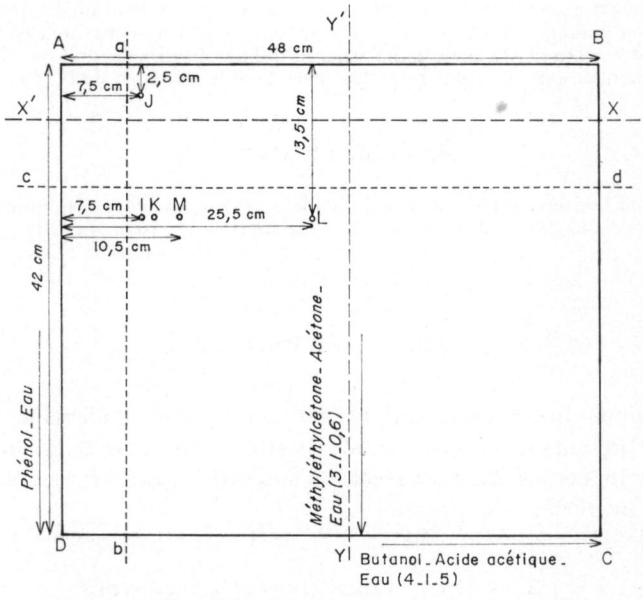


FIG. 1. — *Répartition des déposes sur les chromatogrammes*

(Point I : solution à analyser ; point J : témoins latéraux ; points K, L, M : étalons internes. Droites *ab* et *cd* : lignes de pliage ; X'X et Y'Y : lignes de découpage)

Le solvant employé en première dimension est la phase supérieure du mélange butanol-acide acétique-eau (4/1/5, vol/vol). La durée du développement est de 22 heures.

Après séchage du chromatogramme, la bande portant les témoins latéraux est découpée et révélée à la ninhydrine ; le chromatogramme est ensuite scindé en deux parties, l'une, qui porte les acides aminés de R_F égal ou supérieur à celui de l'acide γ-aminobutyrique et qui est développée orthogonalement avec le mélange méthyléthylcétone-acétone-eau (3-1-0,6, vol/vol), l'autre, qui porte les acides aminés de R_F inférieur et qui est développée orthogonalement au moyen de phénol saturé d'eau.

Après séchage, électrophorégrammes et chromatogrammes sont révélés, puis les taches sont découpées et les acides aminés isolés dosés suivant la technique employée pour l'estimation colorimétrique globale.

Après déduction d'un blanc dû à la coloration du papier, par comparaison avec les gammes obtenues pour chaque acide aminé développé dans les mêmes conditions, les quantités d'acides aminés

présentes sont calculées, exprimées en micromoles ; on en déduit les proportions molaires de chaque acide aminé pour cent de la somme des acides aminés dosés, mode d'expression des résultats qui sera utilisé dans l'exposé qui suit.

5. *Critique de la méthode*

Une étude critique de cette technique a été réalisée ; nous avons pu comparer les résultats obtenus dans l'analyse par chromatographie sur papier avec ceux que fournit la chromatographie sur colonne avec un autoanalyseur Technicon mis aimablement à notre disposition dans ce but par M. J. CARLES. Les deux méthodes ont fourni des résultats très peu différents ; nous avons pu considérer comme valables les données obtenues par chromatographie sur papier.

Mais la concordance des résultats fournis par les deux méthodes n'implique pas nécessairement que soient valables les données obtenues : on peut craindre qu'il ne se produise, au cours de l'hydrolyse, une différenciation artificielle dans la distribution des acides aminés, par suite de la nature différente et de l'interférence des divers constituants des sols présents dans le milieu soumis à l'hydrolyse.

Une étude expérimentale entreprise afin de répondre à cette question a permis de montrer que présence de masses organo-minérales différentes (horizon de surface, horizon profond), placées au contact d'un mélange d'acides aminés n'entraîne pas de modification notable de la répartition des divers acides aminés étudiés, excepté dans le cas de la tyrosine. Cet acide aminé est en partie détruit au cours de l'hydrolyse en présence de sol pauvre en matière organique ; le taux de destruction est relativement élevé (50 p. cent) en présence d'un horizon minéral profond tandis qu'il est nul en présence d'un horizon humique de surface. Cependant, l'écart entre ces deux taux est faible, comparé à l'amplitude des variations de cet acide aminé dans les milieux étudiés de sorte que l'on ne peut attribuer qu'un rôle mineur aux effets de l'hydrolyse dans la différenciation de la répartition des acides aminés.

B. — MILIEUX ÉTUDIÉS

Les 70 sols ou horizons étudiés ici sont les milieux n° 1 à 2 420 dont les caractères pédoclimatiques et culturaux sont décrits dans le précédent travail (DECAU, 1968 ; tabl. 1).

III. — RÉSULTATS

Les techniques que nous venons de décrire ont permis d'identifier la plupart des acides aminés présents dans les sols analysés et de déterminer leurs proportions relatives. Nous examinerons donc les résultats successivement sous leurs aspects qualitatifs puis quantitatifs.

A. — LES ACIDES AMINÉS RENCONTRÉS

22 à 27 composés réagissant à la ninhydrine ont pu être séparés par chromatographie sur papier dans chacun des milieux étudiés ; ce sont principalement des acides aminés : acide aspartique, acide glutamique, acide α-amino-adipique, glycocolle, thréonine, alanine, hydroxyproline, proline, tyrosine, phénylalanine, méthionine, méthionine sulfoxyde, valine, leucine, isoleucine, acide diaminopimélique, β-alanine, acide γ-aminobutyrique, ornithine, lysine, arginine et histidine.

En outre, trois composés de structure différente mais réagissant aussi à la ninhydrine figurent sur les chromatogrammes : ce sont l'histamine, l'éthanolamine et la glucosamine. Au niveau de ce sucre aminé se situe aussi probablement la galactosamine dont la présence a déjà été signalée dans les sols (STEVENSON, MARKS et VARNER, 1954) mais qui n'est pas séparée de la glucosamine avec le système de solvants employé (LEDERER, 1960).

A ces divers composés, il convient d'en ajouter deux autres, non identifiés et dont les R_{leu} et R_F en butanol-acétique et en phénol sont 0,37 et 0,61 pour l'un, 0,35 et 0,95 pour l'autre.

Par ailleurs, l'analyse de quelques échantillons par chromatographie sur résine échangeuse d'ions (autoanalyseur Technicon) a permis de déceler la présence de trois autres composés réagissant à la ninhydrine et qui sont probablement la cystéine, l'acide δ-aminovalérique et la méthylhistidine, laquelle pourrait être le composé de R_F 0,35 et 0,95 en butanol-acétique et en phénol sur les chromatogrammes de papier.

Parmi ces acides aminés, l'un d'eux n'a encore jamais été signalé, à notre connaissance, dans les sols : l'acide δ-aminovalérique. Nous avons pu confirmer la présence de ce composé dans divers milieux [horizons profonds de certains sols, (nº 46 et 50), sol d'Afrique nº 71] par une séparation des acides aminés par électrorhéophorèse suivant la technique de BISERTE et *al.*, (1960).

Bref, 32 composés ont en définitive été décelés parmi lesquels 26 ont été séparés ; ce sont l'acide aspartique, l'acide glutamique, l'acide α-aminoadipique, la sérine, le glycocolle, la thréonine, l'alanine, l'hydroxyproline, la proline, la méthionine, la méthionine sulfoxyde, la tyrosine, la phénylalanine, la valine, la leucine, l'isoleucine, l'acide diaminopimélique, la β-alanine, l'acide γ-aminobutyrique, l'acide δ-aminovalérique, l'ornithine, la lysine, l'histidine, l'arginine, l'histamine et l'éthanolanine.

B. — RÉPARTITION QUANTITATIVE DES ACIDES AMINÉS

L'analyse quantitative a porté sur les 17 acides aminés suivants : acides aspartique, acide glutamique, acide α-aminoadipique, sérine, glycocolle, thréonine, alanine, valine, leucine, isoleucine, hydroxyproline, proline, tyrosine, phénylalanine, acide diaminopimélique, β-alanine, acide γ-aminobutyrique ; de plus le groupe des acides aminés basiques a été analysé globalement.

Nous avons envisagé tout d'abord la répartition globale de ces acides aminés dans l'ensemble des milieux étudiés puis nous avons recherché l'influence des facteurs pédoclimatiques et culturaux et les mécanismes par lesquels ces facteurs peuvent intervenir.

1. *Répartition moyenne des acides aminés*

Trois faits ressortent d'un examen d'ensemble des résultats réunis dans le tableau annexe 1.

a) Les proportions des divers acides aminés sont, en moyenne, très inégales. Le glycocolle, l'alanine, l'acide aspartique et l'acide glutamique comptent chacun pour plus de 10 pour cent de la somme des acides aminés dosés ; les acides aminés basiques, la sérine, la leucine, la valine, la thréonine, l'isoleucine, la proline, la phénylalanine, présentent des proportions moyennes décroissantes comprises entre 7,5 et 3,5 pour cent ; la β-alanine, l'acide γ-aminobutyrique, l'hydroxyproline, la tyrosine, l'acide diaminopimélique et l'acide α-aminoadipique viennent ensuite, beaucoup moins abondants.

b) Les proportions des principaux acides aminés présentent, pour l'ensemble des milieux étudiés, des variations qui sont le plus souvent de faible amplitude. Tel est le cas, par exemple, pour le glycocolle (moyenne 13,0 p. 100 ; écart-type : 1,77), et, d'une façon générale, pour les acides aminés abondants.

c) Les acides aminés peu abondants présentent, en revanche, des proportions molaires plus dispersées et dont certaines paraissent dépendre notamment de la provenance des sols (sols du Cameroun, sols de France) et des horizons étudiés (horizons de surface, horizons profonds).

Ces premiers résultats nous ont conduit à étudier, de façon plus précise et plus approfondie, l'influence de l'origine et des caractères des sols sur la répartition de leurs acides aminés.

2. *Variations de la répartition des acides aminés sous l'influence de conditions pédoclimatiques et culturales*

Comme dans le mémoire précédent, nous avons considéré le sol, à partir de nos données analytiques, comme un système défini par les valeurs de plusieurs variables, c'est-à-dire ici par les proportions de 18 acides aminés.

Nous avons tout d'abord essayé de déterminer dans quelle mesure les valeurs de l'ensemble des variables dépendent des conditions de milieu. Nous avons ensuite cherché puis étudié les variables les plus efficaces dans la différenciation des milieux analysés.

a) *Répartition d'ensemble des acides aminés.*

Nous avons, en premier lieu, mesuré les « distances » qui séparent nos milieux que définissent 18 variables. Nous avons fait appel pour cela aux distances généralisées Djk de KENDALL et STUART (1966) dont nous avons précédemment rappelé la mesure (DECAU, 1968). Après avoir groupé les milieux comme dans la précédente étude, en fonction de leur origine géographique (sols arables de France (SaFr), sols arables du Cameroun (SaCn)), de leur nature (niveaux arables, horizons des profils (P)), de leur situation en profondeur (horizons de surface (Hs), horizons moyens (Hm), horizons profonds (Hp)), et de leur fumure (1), nous avons calculé, appliquant la méthode de KENDALL et STUART, les distances entre les moyennes des groupes (distances inter-groupes).

Ensuite, afin de mesurer la dispersion des milieux autour de leurs moyennes, nous avons calculé les distances entre les divers composants et la moyenne de chaque groupe (distances intra-groupes) ainsi que les distances relatives ou « réduites » entre les groupes.

Nous avons enfin cherché le degré de probabilité qu'ont les principaux groupes d'appartenir à des populations différentes.

α) *Distances inter-groupes.*

Nous avons porté sur un plan (fig. 2) les diverses distances inter-groupes, représentant, avec une distorsion inévitable, des distances qui se répartissent, en fait, suivant un espace à 18 dimensions.

Sur la figure 2 apparaissent à la fois les analogies et les différences entre les sols : ainsi, si nous considérons les trois grands ensembles en lesquels peuvent tout d'abord se répartir les milieux étudiés — sols arables de France, profils de sols de France, sols

(1) La répartition des milieux entre les divers groupes, est indiquée dans le tableau 4 du précédent mémoire (DECAU, 1968). Seuls diffèrent les groupes Hs, Hm et Hp qui comptent respectivement ici, outre les milieux indiqués précédemment, les horizons nº 2417, 2418 et 2420.

arables du Cameroun, nous voyons que la distance entre les moyennes des deux premiers groupes est faible ($D_{SaFr - P} = 4{,}85$) par rapport aux distances entre ces moyennes et la moyenne des sols du Cameroun ($D_{SaFr\text{-}SaCn} = 22{,}95$) ($D_{P\text{-}SaCn} = 39{,}61$).

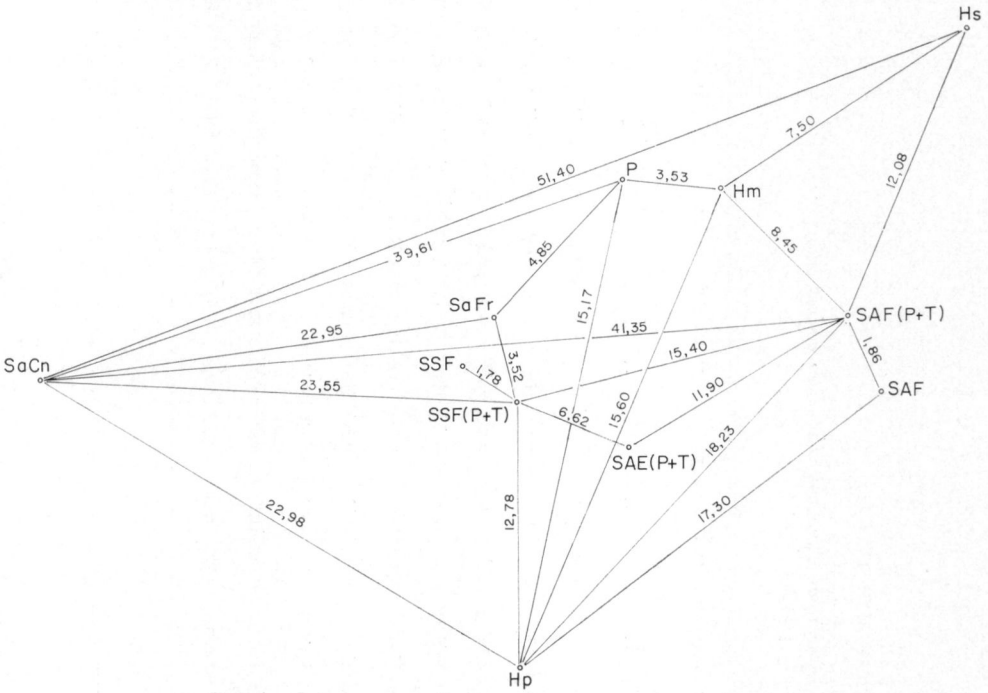


FIG. 2. — *Distances* (D*jk* de KENDALL et STUART) *entre les répartitions d'ensemble des acides aminés totaux dans divers groupes de sols*

SaCn : Sols arables du Cameroun — SaFr : Sols arables de France — P : Profils de sols de France — SSF : Sols sans fumure (sols de France) — SSF (P + T) : Sols sans fumure (Bassin parisien et région toulousaine) — SAE (P + T) : Sols recevant des engrais minéraux (Bassin parisien et région toulousaine) — SAF : Sols recevant du fumier (sols de France) — SAF (P + T) : Sols recevant du fumier (Bassin parisien et région toulousaine) — Hs : Horizons de surface — Hm : Horizons moyens — Hp : Horizons profonds.

Si nous comparons la position des sols d'Afrique non plus seulement à celle des groupes « sols arables » et « profils » de France mais aux sous-groupes plus caractéristiques qui en font partie (sols non fumés, sols fumés, horizons de surface, horizons moyens, horizons profonds), nous voyons que les sols d'Afrique demeurent éloignés de ces divers sous-groupes, mais qu'ils sont plus éloignés des sols fumés que des sols sans fumure, et des horizons de surface que des horizons profonds.

Le seul examen des distances inter-groupes permet donc de mettre en évidence :

1. le caractère particulier des sols camerounais étudiés comparés à l'ensemble des sols de France ;

2. l'action de la fumure et l'influence de la situation des horizons en profondeur sur les distances : sous-groupes des sols de France, sols du Cameroun.

Mais il importe de chercher la valeur relative des distances inter-groupes, c'est-à-dire de rapporter ces distances à la dispersion des milieux à l'intérieur des groupes ou sous-groupes.

TABLEAU I

Distances « réduites » séparant les répartitions d'ensemble des acides aminés totaux dans divers groupes de sols

SaFr (1)		SaCn		Profils (P)		SSF		SSF (P + T)		SAE (P + T)		SAF		SAF (P + T)		Hs		Hm		Hp	
SSF	0,106	SSF	0,759	Hm	0,091	SSF (P + T)	0,047	SSF	0,074	SaFr	0,155	SAF (P + T)	0,058	SAF	0,058	P	0,212	P	0,091	P	0,391
SSF (P + T)	0,131	Hp	0,837	SaFr	0,132	SaFr	0,106	SaFr	0,131	P	0,195	SaFr	0,145	P	0,220	Hm	0,245	SaFr	0,177	SAE (P + T)	0,409
P	0,132	SaFr	0,901	SAF	0,181	P	0,241	Hm	0,217	SAF	0,266	P	0,181	Hm	0,257	SAF	0,386	SSF (P + T)	0,217	SaFr	0,437
SAF	0,145	SAE (P + T)	0,995	SAE (P + T)	0,195	Hm	0,280	P	0,239	SAE (P + T)	0,282	Hm	0,244	SaFr	0,311	SaFr	0,398	SAF	0,244	SSF (P + T)	0,442
SAE (P + T)	0,155	SSF (P + T)	1,118	Hs	0,212	SAE (P + T)	0,282	SAE (P + T)	0,306	SSF (P + T)	0,306	SAE (P + F)	0,266	Hs	0,427	SAF (P + T)	0,427	Hs	0,245	Hm	0,443
Hm	0,177	P	1,280	SAF (P + T)	0,220	SAF	0,388	SAF	0,393	Hm	0,306	Hs	0,386	SAE (P + T)	0,463	SSF (P + T)	0,517	SAF (P + T)	0,257	SSF	0,448
SAF (P + T)	0,311	SAF	1,314	SSF (P + T)	0,239	Hp	0,448	Hp	0,442	Hp	0,409	SSF	0,388	Hp	0,554	SSF	0,612	SSF	0,280	SAF	0,504
Hs	0,398	Hm	1,444	SSF	0,241	Hs	0,612	Hs	0,517	SAF (P + T)	0,463	SSF (P + T)	0,393	SSF (P + T)	0,581	SAE (P + T)	0,664	SAE (P + T)	0,306	SAF (P + T)	0,557
Hp	0,437	SAF (P + T)	1,649	Hp	0,391	SAF (P + T)	0,634	SAF (P + T)	0,581	Hs	0,664	Hp	0,504	SSF	0,634	Hp	0,930	Hp	0,443	SaCn	0,834
SaCn	0,901	Hs	2,252	SaCn	1,280	SaCn	0,759	SaCn	1,118	SaCn	0,995	SaCn	1,314	SaCn	1,649	SaCn	2,252	SaCn	1,444	Hs	0,930

(1) Signification des sigles : voir figure 2.

β) *Distances « réduites » inter-groupes.*

Nous avons calculé les distances relatives ou « réduites » (*d. r.*) en rapportant la distance inter-groupe D à la somme des distances moyennes intra-groupes (*r SaFr*, *r SaCn*...) des ensembles de sols considérés. Ainsi, entre les sols arables de France et les sols arables du Cameroun, nous avons :

$$d.\,r. = \frac{D_{\text{SaFr — SaCn}}}{r_{\text{SaFr}} + r_{\text{SaCn}}} = \frac{22{,}95}{15{,}63 + 9{,}82} = 0{,}90$$

Les diverses « distances réduites » ainsi calculées sont groupées dans le tableau 1. Nous voyons ainsi qu'aux distances inter-groupes $D_{\text{SaFr-P}} = 4{,}85$, $D_{\text{SaFr-SaCn}} = 22{,}95$ et $D_{\text{P-SaCn}} = 39{,}61$ correspondent les distances « réduites » :

$d.\,r._{\text{SaFr-P}} = 0{,}132$, $d.\,r._{\text{SaFr-SaCn}} = 0{,}901$ et $d.\,r._{\text{P-SaCn}} = 1{,}280$.

Les distances « réduites » et les distances inter-groupes varient dans le même sens ; les résultats du tableau 1 viennent donc confirmer et compléter les données de la figure 2.

Le groupe des sols du Cameroun présente, vis-à-vis des divers autres groupes, les distances « réduites » les plus grandes (cf. ligne 10 du tabl. 1) à une exception près, toutefois : la distance réduite entre horizons de surface et horizons profonds est supérieure (0,930) à la distance Sols arables du Cameroun-Horizons profonds (0,837). Mais les distances « réduites » entre milieux recevant des fumures différentes demeurent toujours faibles par rapport aux distances précédentes :

$$d.\,r._{\text{max.}} = d.\,r._{\text{SSF-SAF (P + T)}} = 0{,}634$$

Les données du tableau 1 viennent ainsi montrer que, dans les milieux étudiés, les différences climatiques exercent, sur la répartition des acides aminés, une influence supérieure à celles qui résultent des différences de profondeur et de fumure. Des trois facteurs étudiés, la fumure est celui qui exerce l'action la plus faible.

Par ailleurs, ces données ne viennent guère modifier les positions relatives des groupes de sols représentés sur la figure 2 : proximité relative, vis-à-vis des sols du Cameroun, des horizons profonds et des sols sans fumure, éloignement, par rapport à ces sols africains, des sols français recevant du fumier et des horizons de surface.

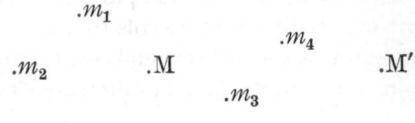
Les résultats du tableau 1 montrent que les distances réduites ont, dans tous les cas, des valeurs faibles : seules, 7 des 55 valeurs du tableau 1 sont supérieures à l'unité. Il existe donc, dans la plupart des cas, une interpénétration certaine entre les groupes, qui, pour la plupart, ne sont probablement pas statistiquement distincts.

Afin de préciser davantage les rapports entre groupes, nous avons tenté de rechercher les seuils de signification de quelques distances réduites observées.

γ) *Signification des distances « réduites ».*

Nous avons cherché la probabilité qu'ont les composants d'un groupe d'appartenir à ce groupe plutôt qu'à un autre, séparé par une distance réduite donnée.

Soient, dans l'espace, d'une part, les milieux m_1, m_2, m_3, m_n et leur moyenne M, d'autre part la moyenne M′ de l'ensemble des milieux m'_1, m'_2, m'_3... m'_n.



Nous avons calculé, comme précédemment (DECAU, 1968), d'une part les distances m_1M, m_2M, ... m_nM, d'autre part les distances m_1M', m_2M', ... m_nM', puis cherché si les deux familles de distances sont significativement différentes.

Quelques résultats, obtenus par ces calculs, ont été réunis dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Distances « réduites » et seuils de probabilité des différences de répartitions d'ensemble des acides aminés totaux dans les sols

Distances	(d. r.)	Seuil de probabilité
SaCn-Hs(1)	2,252	< 0,01
SaCn-SAF (P + T)	1,649	< 0,01
SaCn-SaFr	0,901	< 0,01
SaCn-Hp	0,837	< 0,01
SaCn-SSF	0,759	< 0,01
Hp-Hs.....	0,930	< 0,01
Hp-Hm	0,443	< 0,10
SAF (P + T)-SSF (P + T)	0,581	< 0,20

(1) Signification des sigles : voir figure 2.

Des seuils de probabilité très faibles sont notés pour les valeurs de *d. r.* supérieures à 0,75, des seuils élevés pour les valeurs inférieures à 0,60. Ces résultats mettent donc l'accent sur les caractères très particuliers des sols d'Afrique et sur la relative uniformité des sols de France, exception faite pour les horizons très différents des profils, quant à la distribution de leurs acides aminés.

En définitive, de l'étude globale de la répartition des acides aminés ressortent les faits suivants :

1. Les sols du Cameroun apparaissent comme significativement distincts de tous les groupes de sols de France.

2. Ces groupes, en revanche, à l'exception des horizons profonds qui diffèrent très nettement des horizons de surface ($P < 0,01$), ne sont pas significativement distincts et appartiennent donc probablement tous à la même constellation (VAN DEN DRIESSCHE, 1965).

3. Parmi les facteurs de différenciation étudiés, le climat, la profondeur et la fumure se classent successivement par ordre décroissant d'efficacité.

4. Une interaction se dessine entre les effets des facteurs climatiques et ceux de la profondeur et de la fumure : les horizons profonds et les sols ne recevant pas de fumure sont plus proches des sols d'Afrique par la répartition de leurs acides aminés que ne le sont les horizons de surface et les sols fumés.

Il convient maintenant de rechercher quels sont, parmi les 18 acides aminés analysés, les agents les plus importants dans la différenciation des milieux étudiés.

TABLEAU 3

Distances particulières (d. p.) *et distances particulières « réduites »* (d. p. r) *entre les proportions moyennes des acides aminés des principaux groupes de sols*

		Asp	Glu	Adi	Ser	Gly	Thr	Ala	Val	Leu	Ile	Hyp	Pro	Tyr	Phe	Dpm	β-Ala	γ-Abn	Bas
SaCn-SaFr	d. p.	0,46	0,67	1,17	1,60	0,03	0,13	0,08	1,45	2,10	2,60	0,08	0,33	2,34	0,70	1,45	2,04	2,73	3,00
	d. p. r.	0,23	0,30	1,12	1,74	0,01	0,07	0,03	0,77	2,76	3,66	0,05	0,22	3,12	0,77	0,81	2,13	4,07	2,56
SaCn-SSF(P+T)	d. p.	0,77	1,04	1,17	5,79	0,12	0,00	0,09	1,45	2,28	3,15	0,0	0,04	0,70	1,26	1,45	2,04	1,17	1,04
	d. p. r.	0,52	0,57	0,78	6,51	0,06	0,00	0,04	0,74	4,07	5,94	0,00	0,04	1,32	2,93	0,96	2,40	2,44	1,73
SaCn-SAF(P+T)	d. p.	4,24	2,04	2,47	0,92	0,30	1,50	1,35	5,89	3,91	0,08	0,26	1,71	3,44	3,44	0,42	1,50	0,88	7,10
	d. p. r.	2,54	0,85	2,63	3,07	0,17	0,77	0,71	3,66	5,28	0,11	0,13	0,73	5,46	7,02	0,18	1,29	0,58	12,46
SaCn-Hs	d. p.	1,65	0,45	3,92	2,28	1,35	0,70	0,01	3,08	6,71	4,17	0,42	0,17	6,10	2,22	1,45	7,04	6,81	2,87
	d. p. r.	1,04	0,24	3,44	3,12	0,63	0,44	0,01	1,97	7,53	7,18	0,24	0,14	9,24	1,47	0,94	12,57	0,98	3,34
SaCn-Hp	d. p.	3,45	0,01	3,92	3,38	0,63	0,37	1,82	0,30	0,73	2,10	1,00	1,08	0,08	0,07	0,84	0,08	0,11	3,01
	d. p. r.	1,94	0,00	6,03	3,10	0,22	0,25	1,05	0,14	0,91	1,60	0,44	0,60	0,06	0,06	0,58	0,12	0,24	1,88
SAF(P+T)-SSF(P+T)	d. p.	1,40	0,17	0,24	2,10	0,04	1,45	2,16	1,50	0,22	0,03	0,26	1,21	1,04	0,54	0,30	0,05	0,02	2,67
	d. p. r.	1,12	0,09	0,12	2,08	0,06	0,69	1,48	0,83	0,20	0,03	0,13	0,47	1,93	0,75	0,12	0,04	0,01	4,11
Hp-Hs	d. p.	0,33	0,57	0,00	0,11	0,16	0,05	2,16	1,45	3,01	0,35	2,73	0,40	4,77	1,50	0,08	5,61	5,23	0,00
	d. p. r.	0,23	0,27	0,00	0,07	0,08	0,02	1,91	0,77	2,05	0,20	1,12	0,18	2,79	0,59	0,05	10,20	6,97	0,00
Moyennes	d. p.	1,75	0,71	1,84	2,31	0,38	0,60	1,10	2,16	2,70	1,78	0,68	0,71	2,64	1,39	0,86	2,62	2,42	2,81
	d. p. r.	1,09	0,33	2,02	2,81	0,18	0,32	0,75	1,27	3,40	2,67	0,30	0,34	3,42	1,94	0,52	4,10	3,61	3,72

b) *Répartition des principaux acides aminés.*

Les « distances » de KENDALL et STUART (1966) considérées ci-dessus sont les sommes arithmétiques de 18 distances élémentaires obtenues à partir des écarts observés sur chacun des 18 acides aminés dosés.

Examinons maintenant les composantes de ces distances.

Nous avons réuni, dans le tableau ci-dessus, les distances particulières (*d. p.*) qui séparent les principaux groupes de sols (SaCn, SaFr, SSF (P + T), SAF (P + T), Hs, Hp) ainsi que les « distances particulières réduites » correspondantes.

Distances particulières et distances particulières « réduites » sont en étroite corrélation ; nous examinerons donc simultanément les deux séries de résultats.

Un examen d'ensemble du tableau 3 montre que de nombreux acides aminés participent à la séparation, à la dispersion des groupes de milieux, mais aussi que les acides aminés basiques, la β-alanine, l'acide γ-aminobutyrique, la leucine et la tyrosine sont ceux qui jouent généralement le plus grand rôle (cf. ligne 9 du tabl. 3). Nous étudierons donc plus particulièrement, dans la suite du présent mémoire, la répartition de ces acides aminés.

Les données du tableau 3 montrent aussi que les acides aminés basiques, la β-alanine, l'acide γ-aminobutyrique, la tyrosine et la leucine participent de façon différente aux diverses distances calculées :

— Les acides aminés basiques sont, pour une large part, responsables de l'écart observé entre sols d'Afrique et sols de France recevant du fumier.

— La β-alanine et l'acide γ-aminobutyrique, dont les écarts varient parallèlement d'une distance à l'autre, jouent un grand rôle dans les distances entre horizons de surface et sols d'Afrique d'une part, entre horizons de surface et sols profonds d'autre part.

— La tyrosine et la leucine interviennent surtout dans les distances sols du Cameroun-sols fumés de France et sols du Cameroun-horizons de surface.

Cette analyse des distances intergroupes, à l'échelle des différentes variables, met donc à la fois l'accent sur le rôle particulièrement important de la leucine, de la tyrosine, de la β-alanine, de l'acide γ-aminobutyrique et des basiques, mais aussi sur le rôle extrêmement différent, d'une distance à l'autre, de ces variables principales ; cependant, elle ne nous renseigne pas sur la valeur exacte ni sur le sens des écarts observés.

Nous allons, dans ce but, considérer chacune des 5 variables les plus importantes et donc considérer les proportions molaires de la leucine, de la tyrosine, de la β-alanine, de l'acide γ-aminobutyrique et des acides aminés basiques (tabl. 4).

Les données du tableau 4 montrent que les différences moyennes de proportions molaires d'acides aminés entre des groupes de milieux très différents sont faibles, dans l'ensemble, tant en valeur absolue qu'en valeur relative, bien que nous ayons groupé ici les acides aminés dont les taux sont les plus variables. Cependant, les écarts sont, dans de nombreux cas, hautement significatifs. Il en est ainsi pour chacun des acides aminés lorsqu'on compare le groupe des sols arables de France à celui des sols arables du Cameroun. Par contre, les écarts significatifs concernent seulement 4 et 2 acides aminés respectivement, dans la comparaison des horizons de surface et des horizons profonds d'une part, des sols fumés et sans fumure d'autre part.

Ces résultats sont en accord avec les données du tableau 3. Aux « distances particulières réduites » faibles correspondent des différences faibles et non significatives. Tel est le cas pour les *d. p. r.* SSF (P + T) — SAF (P + T) de la leucine (0,20), de la β-alanine (0,04) et de l'acide γ-aminobutyrique (0,01). Aux *d..p. r.* élevées, voisines de 2 ou supérieures, correspondent, en revanche, des écarts significatifs.

TABLEAU 4

Répartition moyenne comparée des proportions molaires de quelques acides aminés dans les principaux groupes de sols

	Leu	Tyr	β Ala	γ Abu	Ac. am. basiques
Sols arables de France ...	6,9	1,0	2,0	1,8	7,2
Sols arables du Cameroun	4,7 ++ (1)	0,3 ++ (2)	3,1 ++	3,7 ++	10,1 ++
Sols sans fumure (P + T) .	7,0	0,8	2,0	2,0	7,7
Sols avec fumure (P + T)	7,4	1,2 ++	2,1	2,1	6,1 ++
Horizons de surface	8,3	1,6	1,2	1,1	7,2
Horizons profonds	6,3 +++	0,8 +++	2,8 ++	2,9 +++	7,3

(1) +++ : différences significatives au seuil de 0,01,
(2) ++ : différences significatives au seuil de 0,02.

Mais l'examen des proportions molaires des acides aminés n'a pas pour unique résultat de confirmer les résultats antérieurs, de situer les écarts et d'en montrer la valeur statistique : il permet aussi d'en préciser le sens et de pousser plus avant la compréhension des positions relatives des groupes de sols de la figure 2. Ainsi, la parenté, relative, des sols arables du Cameroun et des horizons profonds résulte de leur faible proportion commune de leucine, de tyrosine, de β-alanine, et d'acide γ-aminobutyrique tandis que leur éloignement tire en grande partie son origine des différences de taux d'acides aminés basiques.

De même, la relative proximité des sols sans fumure et des sols du Cameroun, comparée au grand éloignement de ces derniers vis-à-vis des sols fumés s'explique aussi par le fait que sols du Cameroun et sols sans fumure se rapprochent davantage par leurs proportions de tyrosine et d'acides aminés basiques.

En définitive, malgré son uniformité d'ensemble, dans l'échantillon des sols étudiés, la répartition globale des acides aminés s'avère dépendre des conditions climatiques et pédologiques, ainsi que le montre l'analyse comparée de milieux très différents : sols arables de France et sols arables du Cameroun, horizons de surface et horizons profonds.

Les conditions culturales, en revanche, malgré la variété et l'effet cumulé des différences des traitements, marquent d'une plus faible empreinte la répartition des acides aminés.

La leucine, la tyrosine, la β-alanine, l'acide γ-aminobutyrique et les acides aminés basiques sont les acides aminés dont les proportions présentent, sous l'effet de conditions pédoclimatiques diverses, les plus grandes amplitudes de variation.

Nous nous proposons maintenant, à partir des données descriptives que nous venons de résumer, de chercher et d'expliquer l'origine de l'homogénéité d'ensemble et des différences particulières observées dans la répartition des acides aminés des sols.

IV. — DISCUSSION

A. — Homogénéité de composition des sols en acides aminés

La matière organique du sol, considérée dans son ensemble, ne constitue pas une masse homogène mais comprend à la fois :

— des résidus organiques non décomposés ou en voie de décomposition, provenant des plantes qui se développent sur le sol,

— les corps des organismes vivant dans le sol et participant plus ou moins, directement ou indirectement, à l'évolution de ces résidus organiques,

— des complexes de néoformation constituant l'humus.

La relative uniformité de distribution des acides aminés d'un milieu à l'autre implique l'uniformité de répartition des acides aminés dans ces divers constituants organiques du sol.

1° Des résidus végétaux très différents ont été analysés par Sowden et Ivarson (1959). Ces auteurs ont déterminé les 16 acides aminés principaux contenus dans les litières de feuilles caduques et les aiguilles de résineux et montré qu'il n'existe pas d'écart notable entre ces deux types de résidus organiques, pourtant très différents.

Les analyses de Lugg (1949) et de Fauconneau (1960), relatives à diverses plantes fourragères, luzerne et graminées notamment, conduisent à des conclusions voisines.

On ne peut donc guère attendre, de différences dans la nature des résidus végétaux, une diversification des sols dans la répartition de leurs principaux acides aminés.

2° Aux différences de nature et d'abondance des matières végétales vient s'ajouter la diversité des organismes vivant dans le sol.

Sowden et Ivarson (1959) ont ainsi montré la large prédominance des bactéries et des actinomycètes dans un sol brun forestier et celle des champignons dans un podzol. Mais ces auteurs ont aussi observé qu'il n'en résulte pas de différences dans la répartition des acides aminés.

Ceci peut provenir du fait que la répartition des principaux acides aminés ne diffère pas fondamentalement d'une espèce microbienne à l'autre, comme le montrent notamment, pour quelques acides aminés, les analyses de Reusser, Spencer et Sallans (1957) et celles d'Anderson et Jackson (1958), et aussi du fait que ces organismes, quoique abondants, ne renferment qu'une fraction assez limitée des acides aminés totaux du sol.

3° A la relative uniformité de composition des résidus organiques des végétaux et des nombreux organismes du sol s'ajoute celle des complexes humiques de néoformation. Ceci a été montré par les observations de PARKER, SOWDEN et ATKINSON (1952), comparant la distribution des acides aminés dans plusieurs fractions humiques colloïdales issues de sols très différents, puis confirmé par BREMNER (1955 *a*, 1955 *b*) et JACQUIN (1960, 1963) respectivement, dans la comparaison d'acides humiques gris et bruns issus d'un même sol et dans celle d'acides humiques issus d'horizons très différents.

Les analyses de ces différents auteurs ont montré que les acides aminés les plus abondants sont, dans chaque cas, l'acide aspartique, l'acide glutamique, le glycocolle, l'alanine et les leucines.

Ces similitudes permettent d'expliquer la relative uniformité de répartition observée pour les acides aminés les plus abondants. Mais nos analyses ont aussi montré que la répartition de certains acides aminés dépend soit des conditions climatiques, soit de la fertilisation appliquée au sol ou encore de la nature et de la situation des horizons de sol.

B. — LES DIFFÉRENCES DE RÉPARTITION DES ACIDES AMINÉS ET LEURS CAUSES

L'origine des écarts, qui résultent de l'influence du climat, de la fumure et de la profondeur, dans les répartitions observées des acides aminés, peut tout d'abord être recherchée dans l'action de ces facteurs sur la teneur des sols en matières organiques. Mais de ces facteurs dépend aussi l'état d'humification de la matière organique.

Par ailleurs, les conditions de sol (pH, nature et proportions relatives des divers constituants) et les conditions climatiques et culturales interfèrent.

Nous serons donc naturellement conduit à envisager successivement le rôle du taux et de la nature des matières organiques et celui des conditions de sol.

1. *Influence de la teneur des milieux en matière organique*

Le niveau humique des sols étudiés dépend des conditions climatiques, de la fumure et de la profondeur, ce qu'illustrent les résultats du tableau 5 dans lequel sont réunies les teneurs moyennes en matière organique des principaux groupes de sol.

TABLEAU 5

Teneurs moyennes des principaux groupes de sols en matière organique

	Hp	SSF (P + T)	Hm	SaCn	Hs
Mat. org. % de sol.	1,25	1,73	2,16	5,92	8,58

Mais, la teneur en matière organique ne saurait être, pour l'ensemble des milieux analysés, l'unique facteur de différenciation des proportions molaires des divers acides aminés. Rapprochons, en effet, les données ci-dessus (tabl. 5) et les résultats de la figure 2. Si nous prenons pour base la répartition des acides aminés dans les milieux les plus pauvres en matière organique (SSF (P + T) et Hp), nous voyons que les

milieux plus riches (SaCn, SAF (P + T)), Hs) ne s'en écartent pas tous trois suivant la même direction. Les sols du Cameroun et les horizons de surface se placent de « part et d'autre » de ces milieux malgré leurs teneurs en matière organique assez voisines. Par contre, les sols fumés et les horizons de surface, milieux provenant de France, s'éloignent de SSF (P + T) et de Hp dans des directions plus voisines.

Ces observations montrent qu'il ne faut pas chercher dans la variation du taux de matière organique la principale origine des différences de répartition des acides aminés dans l'ensemble des milieux étudiés.

Il convient donc de ne pas envisager seulement le résultat global de l'action des facteurs climatiques, pédologiques et culturaux, c'est-à-dire leur effet sur le bilan humique, mais plutôt de considérer leur action sur les diverses phases de la dynamique de l'humus. Une approche dans cette voie est fournie par la détermination des proportions relatives de matière organique libre, non humifiée, et de matière organique liée, transformée en humus, simultanément présentes dans les sols.

2. *Influence du degré d'humification de la matière organique*

La répartition de la matière organique entre ces deux formes apparaît comme très différente dans les divers groupes de milieux étudiés : le rapport $\frac{\text{M. o libre}}{\text{M. o liée}}$, très faible dans les sols du Cameroun (tabl. 6), s'élève dans les horizons profonds et dans les sols sans fumure, pour atteindre ses valeurs maximales dans les horizons de surface des profils.

TABLEAU 6

Proportions relatives moyennes de la matière organique libre et de la matière organique liée dans différents groupes de sols

SaCn	SSF (P + T)	SAF (P + T)	Hp	Hs
0,068	0,123	0,214	0,094	0,440

Or, la distribution des acides aminés varie régulièrement en fonction des proportions relatives de matière organique libre et liée : les distances intergroupes D_{jk} qui séparent SaCn de Hp, de SSF (P + T), de SAF (P + T) et de Hs sont croissantes (22,98 ; 23,55 ; 41,35 ; 51,40), comme le sont aussi, dans ces groupes de sols, les rapports M. o libre/M. o liée.

Il semble donc que l'on puisse attribuer au degré d'humification différent de la matière organique des sols, la répartition différente de leurs acides aminés.

Cette hypothèse a été vérifiée par l'analyse des acides aminés contenus dans la matière organique libre et dans la matière organique liée issues de plusieurs horizons de sol.

Les diverses fractions organiques, séparées par la méthode densimétrique de MONNIER, TURC et JEANSON-LUUSINANG (1962) présentent une répartition différente

de leurs acides aminés, ce qu'illustre la figure 3 sur laquelle ont été rappelées les positions relatives des sols du Cameroun, des horizons de surface et des horizons profonds. Les fractions libres, quel que soit l'horizon d'où elles sont issues, demeurent voisines et se situent l'une et l'autre près de Hs ; les matières organiques liées, par contre, se situent diversement suivant leur provenance : au voisinage de Hs, entre Hs et Hp, lorsqu'elles sont issues d'un horizon de surface, au voisinage de Hp, entre Hp et SaCn, lorsqu'elles proviennent d'un horizon profond. Matières organiques libres et matières organiques liées « encadrent » ainsi à peu près Hs et Hp, résultat logique puisque Hs et Hp renferment à la fois des matières organiques libres et des matières organiques liées ; mais elles restent éloignées de SaCn qui occupe une position « extérieure », éloignée du polygone Mo libre (Hp)-Mo libre (H)-Mo liée (Hs)-Mo liée (Hp)-Hp-Hs.

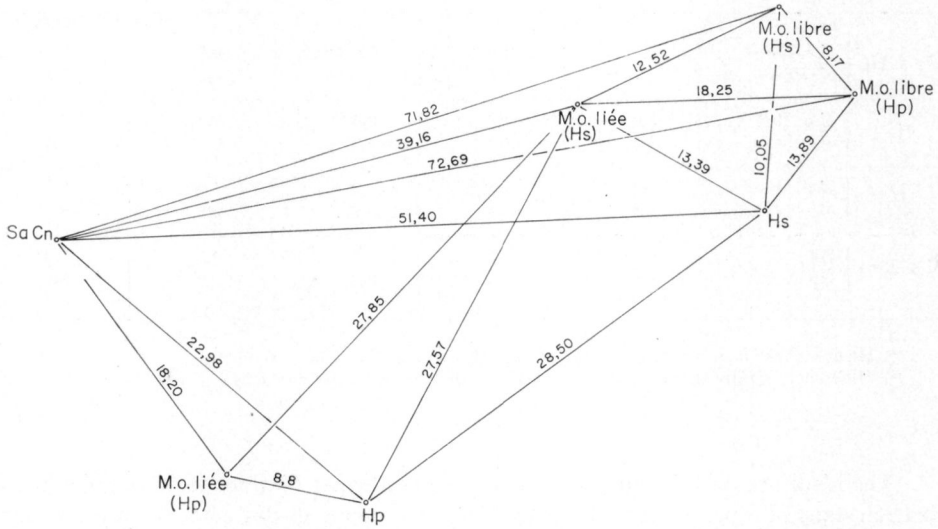


FIG. 3. — *Distances* (D*jk* de KENDALL et STUART) *entre les répartitions d'ensemble des acides aminés totaux dans les sols et dans les matières organiques libres et liées*

Cette position particulière de SaCn ainsi que la valeur élevée de la distance M. o. liée Hs-M. o. liée Hp, distance qui sépare deux matières organiques que l'on pourrait *a priori* croire de même nature, montrent qu'interviennent aussi, outre le degré d'humification, les *conditions* dans lesquelles celle-ci a lieu.

La comparaison des proportions molaires des acides aminés étudiés précédemment (leucine, tyrosine, β-alanine, acides γ-aminobutyrique et basiques), qui jouent ici encore, dans la différenciation des substrats, un rôle très important, va nous permettre de localiser les principales différences.

Nous voyons (cf lignes 1 et 2 du tableau 7) que la matière organique libre diffère de la matière organique liée à la fois par ses proportions supérieures de leucine et de tyrosine et ses proportions plus faibles de β-alanine et d'acide γ-aminobutyrique. En revanche, la proportion des acides aminés basiques n'est pas différente.

Mais les écarts entre matière organique libre et matière organique liée des horizons de surface sont faibles et significatifs en un cas seulement, tandis qu'ils sont plus importants et plus largement significatifs lorsqu'on considère les deux formes de ma-

tière organique des horizons profonds ; il en résulte qu'apparaissent, entre les humus issus de niveaux de profondeur différente, des écarts importants entre les proportions de leucine et de tyrosine, moins abondants en profondeur, et les proportions de β-alanine et d'acide γ-aminobutyrique, plus abondants.

TABLEAU 7

Répartition moyenne (1) *comparée des proportions molaires de quelques acides aminés dans la matière organique libre et dans la matière organique liée de divers horizons de sols*

Acide aminé		Leucine	Tyrosine	β Alanine	Acide γ-amino-butyrique	Acides aminés basiques
Hs + Hp	M.o libre	7,5 ++	1,8 +	1,0 +++	0,6 +	8,6
	M.o liée	6,1 (2)	1,0	2,3	1,7	7,9
Hs	M.o libre	8,0	1,8	0,6 +++	0,2	7,7
	M.o liée	6,9	1,5	1,3	0,5	7,5
Hp	M.o libre	7,0	1,8 +	1,3 +++	1,0 +	9,4
	M.o liée	5,5	0,5	3,3	2,9	8,2
M.o liée	Hs	6,9 +	1,5	1,3 +	0,5	7,5
	Hp	5,5	0,5	3,3	2,9	8,2

(1) Horizons fractionnés : Hs (n° 20, 43 et 47) ; Hp (n° 23, 46 et 50).
(2) Différences significatives au seuil de 0,05 (+), de 0,02 (++) ou de 0,01 (+++).

Les résultats du tableau 7 viennent donc confirmer l'influence du degré d'humification dans la répartition de la leucine, de la tyrosine et des acides ω aminés dans les sols sans fumure et dans les sols fumés, dans les horizons de surface et dans les horizons profonds, dans les sols de France et dans les sols du Cameroun. Ils localisent en partie les différences, entre humus de surface et humus profonds d'une part, et entre sols de France et sols du Cameroun d'autre part, mais ils ne permettent pas d'expliquer ces différences.

Celles-ci doivent nécessairement résulter des conditions de milieu différentes dans lesquelles évoluent les acides aminés.

3. *Influence des conditions de sol*

Les conditions pédologiques interfèrent avec les conditions climatiques et culturales dans leur action sur les grandes phases de l'évolution de l'azote et agissent donc sur les proportions relatives de matière organique libre ou liée, il apparaît aussi que certains caractères des sols, notamment le pouvoir absorbant et l'acidité ou la teneur en calcaire, interviennent plus directement dans le métabolisme des acides aminés ; c'est ce que suggèrent plusieurs de nos résultats analytiques.

Nous avons noté (tabl. 8), dans les sols arables de France, une augmentation des proportions d'acides aminés acides avec le taux d'argile (coefficient de corrélation

égal à 0,66 ; relation hautement significative). Dans ces mêmes sols, les proportions de ces acides aminés sont aussi plus faibles dans les milieux acides que dans les milieux calcaires ; il en va de même dans les profils.

TABLEAU 8

Influence du taux d'argile et du calcaire des sols arables sur la répartition relative des acides aminés acides

	Taux d'argile p. 100					Taux de calcaire p. 100	
	0-10	10-15	15-20	20-25	25-40	0 (pH < 7,0)	0,1-50,0
Proportions d'acides aminés acides (1) ..	19,4	20,2	23,1	23,8	25,2	20,8	24,3 +++

(1) P. 100 d'acides aminés totaux.

L'augmentation du taux d'acides aminés acides avec la teneur en argile et avec le pH ou la teneur en calcaire pourrait résulter d'une protection de ces acides aminés contre la dégradation microbienne, par adsorption ou par insolubilisation, comme le suggèrent aussi, pour des sédiments lacustres, les observations de SWAIN (1961).

De même, les teneurs élevées des sols d'Afrique en acides aminés basiques pourraient provenir, non seulement d'une active synthèse de ces acides aminés par les microorganismes, mais aussi de leur protection contre la dégradation bactérienne ; les acides aminés pourraient se trouver protégés grâce à leur adsorption sur les colloïdes minéraux de ces sols, soit à l'état isolé, soit sous forme de protéines (complexes silico-protéiques d'ESTERMANN, PETERSON et MC LAREN, 1959).

De même, les variations des proportions de divers acides aminés dans les fractions humiques d'horizons de profondeur différente, variations qui présentent leur plus grande amplitude dans les sols à pseudogley, suggèrent l'intervention d'un facteur variant avec la profondeur, l'aération du milieu.

Or, vers la profondeur, diminuent surtout les taux de deux acides aminés hydroxylés, la tyrosine et l'hydroxyproline. L'abaissement des proportions de ces acides aminés peut s'expliquer de diverses manières : il paraît possible que ces acides aminés oxygénés ne se forment pas en aussi grande quantité dans les horizons profonds que dans les horizons superficiels ; il se peut aussi qu'ils soient utilisés par les microorganismes en milieu pauvre en oxygène, de préférence à certains acides aminés qui n'en renferment pas.

Par ailleurs, la présence, en plus grande quantité dans les horizons profonds que dans les horizons de surface, de β-alanine et d'acide γ-aminobutyrique pourrait aussi être liée aux différences d'aération des milieux.

Afin de tenter de vérifier ces dernières observations et ces hypothèses, nous avons étudié l'influence des conditions d'aération sur l'évolution des acides aminés. Le travail expérimental réalisé dans ce but et les résultats obtenus seront décrits dans un prochain mémoire.

V. — CONCLUSION

A la diversité de provenance et de fumure des sols et des profils analysés correspond une uniformité d'ensemble de la répartition de la plupart des acides aminés, uniformité qui n'exclut pas cependant certaines variations particulières importantes ; prédominance des acides aminés basiques et des acides ω aminés sous climat sub-équatorial, de la tyrosine dans les sols fumés et dans les horizons de surface notamment.

L'uniformité de répartition s'explique par les convergences de structure et de métabolisme des êtres vivants.

La diversité résulte, dans une faible mesure, de l'influence des facteurs climatiques, pédologiques et culturaux sur le niveau humique et, pour une plus large part, de l'influence de ces facteurs sur les rythmes relatifs d'organisation, d'humification et de minéralisation de l'azote.

L'analyse de la répartition des acides aminés dans des milieux de texture et de pH différents suggère en outre l'influence active, sur la dynamique des acides aminés, de certaines propriétés des sols (pouvoir absorbant, pH) ; celles-ci interviendraient notamment par des phénomènes de protection contre la dégradation microbienne (par adsorption ou par insolubilisation) ; ainsi s'expliquerait, au moins en partie, les proportions élevées d'acides aminés basiques des sols d'Afrique et celle des acides aminés acides dans ces même sols et dans des sols de France argileux ou calcaires.

Enfin, la comparaison de matières humiques provenant d'horizons divers met en lumière des différences de répartition des acides aminés indépendantes de la nature de la matière organique mais liées en revanche à la situation de ces horizons dans les profils. Ces différences paraissent devoir résulter, au moins partiellement, de l'influence des conditions d'aération de ces milieux sur la répartition de leurs acides aminés.

Reçu pour publication en août 1968.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE EFFECTS OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE SOIL'S NITROGEN DISTRIBUTION

II. — AMINO-ACIDS EXTRACTED BY HYDROLYSIS

The distribution of the amino-acids extractible by hydrolysis has been investigated in 70 soils or horizons included within a wide range of pedo-climatic and cultural conditions.

Qualitative analysis of the hydrolyzates has enabled to detect and identify, in the deep horizons of some profiles, a new amino-acid of the soil : the δ amino-valeric acid.

Quantitative analysis of the amino-acids, and calculation of the intervals (*Djk* KENDALL and STUART's intervals) between the observed distributions of these compounds, has permitted to evince and specify the effects of climatic, pedological and cultural conditions.

The soils in the Cameroons are in a sub-equatorial tropical climate and belong, owing to the distribution of their aminoacids, to populations other than the soils in France where the climates are temperate (manured or unmanured soils, surface, moderately-deep and deep horizons). Thus, the proportions of basic amino-acids and ω-amino-acids are higher while the proportions of leucine and tyrosine are lower in African soils than the analysed French ones.

Analysis of the successive levels of various profiles also evidenced substantial differences that depend on the position of horizons in depth : as depth increases, the molar proportions of β alanine and γ-amino-butyric acid increase, while the percentages of leucine and tyrosine drop.

Lesser variations, mostly unsignificant, are caused in French tillable soils, by manure.

Analysing how the pedo-climatic and cultural factors take effect shows :

i) the slight effect of these factors through the humic level ;

ii) their effect more marked owing to their action on the pedogenesis, humification and mineralization of the organic matter (influence of the relative proportions of either free or bound organic matter to the distribution of the amino-acids) ;

iii) their effects on the processes of synthesis and bacterial degradation of the amino-acids (protective phenomena against bacterial degradation arising from clay or limestone, influence of acidity and aeration conditions).

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER MILIEUEIGENSCHAFTEN AUF DIE VERTEILUNG DES BODENSTICKSTOFFES

II. — MITTELS HYDROLYSE EXTRAHIERTE AMINOSÄUREN

Die Verteilung der mittels Hydrolyse extrahierbaren Aminosäuren wurde in 70 Böden oder Horizonten untersucht, die eine breite Skala von pedoklimatischen und landwirtschaftlichen Bedingungen darstellten.

Die qualitative Analyse der Hydrolysate erlaubte, in den tiefen Horizonten gewisser Profile eine neue Aminosäure des Bodens : die δ Aminovaleriansäure, zu entdecken und zu identifizieren.

Die quantitative Analyse der Aminosäuren und auch die Berechnung der Abstände (Abstände Djk de KENDALL und STUART), die beobachteten Verteilungen dieser Zusammensetzungen trennen, erlaubten, den Einfluss der klimatischen und pedologischen und landwirtschaftlichen Bedingungen zu erklären und zu präzisieren.

Die einem subäquatorialen, tropischen Klima ausgesetzten Böden des Kameruns gehören, durch die Verteilung ihrer Aminosäuren, einer Art an, die sich von den mässigen klimatischen Bedingungen ausgesetzten Böden Frankreichs unterscheidet (ungedüngte Böden, gedüngte Böden, Oberflächen-Horizonte, mittlere und tiefe Horizonte). So ist insbesondere der Anteil an basischen Aminosäuren und an Aminosäuren grösser, und der Anteil an Leusin und an Tyrosin schwächer in diesen afrikanischen Böden, als in den untersuchten französischen Böden.

Bedeutsame Unterschiede, die von der Lage der tiefliegenden Horizonte abhängen, werden auch, mittels der Analyse der aufeinanderfolgenden Ebenen verschiedener Profile, festgestellt : mit zunehmender Tiefe werden insbesondere die molaren Verhältnisse von β-Alanin und γ-Aminobuttersäure grösser, und die von Leucin und Tyrosin schwächer.

Variationen geringeren Umfangs, die meistens unwesentlich sind, werden in den französischen Ackerböden durch die Düngung hervorgerufen.

Die Analyse der Wirkungsweise der pedoklimatischen und landwirtschaftlichen Faktoren zeigt :

— die schwache Einwirkung dieser Faktoren durch die Vermittelung der humushaltigen Ebene.

— ihre ausgeprägtere Einwirkung durch die Vermittelung ihres Einflusses auf die Organisations-feuchtykeits- und Mineralisierungsphänomene der organischen Materie (Einfluss der relativen Anteile an freier oder gebundener organischer Materie auf die Verteilung der Aminosäuren).

— ihre Einwirkung auf die durch Bakterien hervorgerufenen Synthese- und Abbauverfahren der Aminosäuren (Die dem Ton oder dem Kalk zuzuschreibenden Schutzwirkungen gegen Bakterienabau, Einfluss des Säure- und Belüftungszustandes).

РЕЗЮМЕ

К изучению влияния условий среды на распределение азота почв.

II. Амино-кислоты экстрагированные с помощью гидролиза.

Ж. ДЭКО.

Автор изучил распределение амино-кислот экстрагированных с помощью гидролиза из 70-ти образцов почв и почвенных горизонтов, представляющих широкий веер педологическо-климатических условий, а также и условий окультуривания.

Качественный анализ гидролизатов позволил выявить и отождествить в глубоких горизонтах некоторых профилей новую почвенную амино-кислоту : γ-амино-валериановую.

Количественный анализ амино-кислот и вычисление расстояний (расстояния D. JR Кендалля и Стюарта) разделявших наблюдавшиеся распределения этих соединений, позволили выявить и уточнить эффект климатических и педологических условий, также как и условий культуры.

В смысле распределения их амино-кислот почвы Камеруна, расположенные в тропическом субэкваториальном климате, принадлежат к иной группировке чем почвы Франции, лежащие в поясе умеренного климата (почвы неудобренные, удобренные почвы, поверхностные горизонты, средние и глубокие горизонты); так, в частности, пропорции основных амино-кислот и γ-амино-кислот более велики, а пропорции лейцина и тирозина — более низки в африканских почвах по сравнению с анализированными французскими почвами.

При помощи анализов последовательных уровней разных профилей автору удалось также выявить крупные различия, в зависимости от глубины расположения горизонтов; по мере углубления увеличиваются, в частности, молярные пропорции β-аланина и γ-амино-маслянной кислоты, в то время как содержание лейцина и тирозина — уменьшается.

Изменения меньшего порядка, не показательные в большинстве случаев, вызываются во французских пахотных почвах — удобрением.

Анализ действия педологическо-климатических факторов и окультуривания выявил :

— Незначительное действие этих факторов на уровень гумуса.

— Действие более заметное на явления организации, гумификации и минерализации органического вещества (влияние относительных пропорций свободного или связанного органического вещества на распределение амино-кислот) — действие на процессы синтеза и микробиальной деградации амино-кислот (явления защиты против микробиальной деградации, вызванные глиной или известняками, влияние условий кислотности и аэрации).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON R. F., JACKSON R. W., 1958. Essential amino-acids in microbial proteins. *App'. Microbiol.*, **6**, 369-373.

BISERTE G., PLAQUET-SCHOONAERT Th., BOULANGER P., PAYSANT P., 1960. Séparation des acides aminés des milieux biologiques complexes. Description d'un couplage de méthodes chromatographiques et électrophorétiques. *J. Chromatogr.* **3**, 25-47.

BREMNER J. M., 1955 *a*. Nitrogen distribution and amino-acid composition of fractions of a humic acid from a chernozem soil. *Z. Pflanzenern. Dung. Bodenk.*, **71**, 63-66.

BREMNER J. M., 1955 *b*. Nitrogen transformations during the biological decomposition of straw composted with inorganic nitrogen. *J. agric. Sci.*, **45**, 469-475.

CARLES J., SOUBIES L., GADET R., 1958. Les acides aminés du sol et leurs variations. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 1229-1232.

DECAU J., 1968. Contribution à l'étude de l'influence des conditions de milieu sur la répartition de l'azote dans le sol. I. Principales formes d'azote obtenues par hydrolyse. *Ann. agron.*, (en cours d'impression.)

ESTERMANN E. F., PETERSON G. H., MC LAREN A. D., 1959. Digestion of clay-proteins, silico-protein complexes by enzymes and bacteria. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 31-36.

FAUCONNEAU G., 1960. Les fractions azotées et les acides organiques des graminées et des légumineuses. *Proc. 8 th. Inter. Grassland Congr. 8B*, 617-620.

JACQUIN F., 1960. Évolution des acides aminés pendant la décomposition de la matière organique du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1810-1811.

JACQUIN F., 1963. *Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques*. Thèse (Univ. Nancy).

KENDALL M. G., STUART A., 1966. *The advanced theory of statistics*. 3. Design and analysis, and time series. London Griffin ed.

LEDERER E., 1960. Chromatographie en chimie organique et biologique. Vol II. *Applications en chimie biologique*. Masson et Cie Ed.

LUGG J. W. H., 1949. Plant proteins. *Adv. Protein Chem.* Acad. Press. Ind. New-York, 230-304.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

PARKER D. R., SOWDEN F. J., ATKINSON H. J., 1952. The nitrogen distribution and amino-acid content of certain soil organic matter fraction. *Sci. Agric.*, **32**, 163-169.

REUSSER F., SPENCER J. F. J., SALLANS H. R., 1957. Essential amino-acids in micro-organisms. *Canad. J. Microbiol.*, **3**, 721-728.

SOWDEN F. J., IVARSON K. C., 1959. Decomposition of forest litters. II. Changes in the nitrogen constituents. *Plant and Soil*. **11**, 249-261.

STEVENSON F. J., 1956. Effect of some long-time rotation on the amino-acid composition of the soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 204-208.

STEVENSON F. J., MARKS J. D., VARNER J. E., 1954. Ion exchange chromatography of the amino-acids in soil hydrolysates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18**, 373-377.

SWAIN F. M., 1961. Limnology and amino-acid content of some lake deposits in Minnesota, Montana, Nevada and Louisiana. *Bull. geol. Soc. Amer.*, **18**, 519-546.

VAN DEN DRIESSCHE R., 1965. La recherche des constellations de groupes à partir des distances généralisées D^2 de Mahalanobis. *Biom. Prax.* 6, 1, 36-47.

TABLEAU ANNEXE I

Proportions molaires des acides aminés

N°	Asp	Glu	Aad	A. am. acides	Ser	Gly	Thr	Ala	Val	Leu	Ile	Hyp	Pro	Tyr	Phe	Dpm	β Ala	γ Abu	A. am. neut.	A. am. basi.
1	10,8	11,3	0,9	23,0	7,7	13,2	3,0	10,8	8,5	7,0	5,2	1,5	3,2	0,8	4,0	0,9	1,8	1,8	69,4	7,6
3	11,5	11,5	0,7	23,7	7,6	15,6	4,0	9,9	7,5	6,7	4,6	1,3	1,7	0,9	3,0	1,2	2,6	2,1	68,7	7,6
4	10,5	11,5	0,7	22,3	6,8	12,8	4,0	13,1	7,3	7,1	5,5	1,2	2,8	1,0	3,3	1,3	2,6	3,5	72,3	5,4
5	13,1	9,4	0,9	23,4	7,3	12,9	5,5	12,6	6,0	5,5	4,0	1,3	3,0	0,7	3,3	1,1	2,3	2,6	68,1	8,5
6	12,4	10,5	0,9	23,8	6,4	12,6	6,8	11,9	6,9	5,8	3,8	2,4	3,6	0,9	3,6	0,7	1,9	1,5	68,8	7,4
7	11,4	9,9	0,4	21,7	6,5	12,2	6,9	12,4	6,4	6,8	4,0	2,2	4,5	1,1	4,7	1,6	1,4	1,4	71,1	7,2
10	11,8	11,0	0,9	23,7	6,5	12,2	4,9	10,4	6,7	7,1	4,8	2,6	5,0	1,1	3,4	0,3	1,4	1,6	68,0	8,3
11	11,3	10,8	0,5	22,6	6,8	13,0	5,6	11,6	6,8	6,8	4,2	2,6	5,2	1,2	2,9	0,4	1,9	1,9	70,9	6,5
12	11,0	11,1	0,9	23,0	6,5	13,8	4,3	11,9	8,1	6,2	4,3	2,1	3,0	1,4	4,5	0,3	1,9	1,8	70,3	6,7
14	9,7	8,9	0,5	19,1	9,3	14,4	4,6	12,8	7,1	8,1	4,1	2,0	4,0	0,6	2,8	0,5	0,7	2,1	74,1	6,8
15	7,6	8,6	0,5	16,7	7,2	14,2	6,1	12,6	6,8	7,3	4,1	2,3	6,2	0,8	2,7	0,7	2,3	2,3	75,6	7,7
16	6,2	7,9	0,5	14,6	5,8	13,4	6,5	13,8	8,2	8,9	5,1	1,4	6,3	0,8	3,4	0,4	3,1	2,8	79,9	5,5
17	10,9	10,9	0,2	22,0	8,6	13,7	5,1	11,5	5,9	7,1	4,5	1,4	3,5	0,6	3,5	0,6	2,6	1,9	70,5	7,5
18	8,2	11,5	0,7	20,4	7,9	14,8	5,3	12,8	5,7	6,4	3,7	1,7	4,3	0,8	2,6	0,5	2,3	2,3	71,1	8,5
19	7,1	7,6	0,7	15,4	7,4	13,2	5,6	14,4	7,3	7,8	4,2	3,0	6,6	1,6	3,5	0,8	1,7	1,0	79,1	5,5
54	13,0	9,8	0,5	23,3	8,8	17,6	3,9	13,8	6,3	5,3	3,9	1,5	3,2	0,9	1,8	0,2	1,8	1,6	70,6	6,1
55	14,2	9,5	0,7	24,4	5,8	13,4	2,8	12,6	5,8	5,6	4,8	3,1	4,2	1,0	3,8	0,4	2,1	1,9	67,3	8,3
56	13,4	8,2	0,5	22,1	7,6	15,0	6,1	13,8	6,1	6,2	3,5	1,6	4,2	0,9	2,6	0,3	2,5	1,4	71,8	6,1
57	12,8	11,0	0,9	24,7	5,0	14,0	4,2	10,9	6,2	7,2	3,9	1,9	4,2	1,5	4,4	0,6	2,1	1,2	67,3	8,0
66	9,2	11,3	0,9	21,4	5,9	16,0	4,9	11,5	5,1	4,3	2,7	1,5	4,4	0,3	3,0	2,0	3,0	5,0	69,6	9,0
67	14,3	12,0	1,2	27,5	6,2	10,5	4,8	10,4	7,4	6,1	3,4	2,5	3,9	0,9	2,8	0,6	2,1	2,3	64,9	7,6
68	14,2	12,0	1,3	27,5	5,2	14,4	3,8	10,1	4,6	4,0	1,9	1,4	3,9	0,3	2,6	1,7	2,9	4,5	61,2	11,3
69	13,1	11,9	1,4	26,4	5,0	13,0	3,8	13,7	5,0	5,1	3,6	1,4	2,3	0,6	2,5	0,5	2,5	3,9	62,9	10,7
70	11,3	7,3	0,7	19,3	4,7	14,9	4,8	13,2	5,7	4,6	3,0	1,7	3,6	tr.	2,6	1,7	4,4	4,0	70,9	11,8
71	12,7	11,9	0,9	25,5	4,7	12,1	5,4	12,6	5,3	4,3	2,9	2,5	3,7	tr.	2,6	1,7	3,9	2,5	64,2	10,3
20	10,7	10,7	0,4	21,8	6,0	13,0	4,2	11,6	6,9	7,3	4,5	3,8	4,3	2,4	3,8	0,3	1,9	1,0	71,1	7,2
21	10,5	8,6	0,2	19,3	8,5	13,9	4,9	12,1	6,7	6,8	3,9	2,9	3,3	1,6	5,0	0,5	1,7	1,7	73,5	7,2

TABLEAU ANNEXE I (*suite*)

N°	Asp	Glu	Aad	A. am. acides	Ser	Gly	Thr	Ala	Val	Leu	Ile	Hyp	Pro	Tyr	Phe	Dpm	β Ala	γ Abu	A. am. neut.	A. am. basi.
22	8,7	10,2	0,3	19,2	8,6	10,8	5,4	13,8	7,2	7,9	5,0	2,3	5,8	0,9	2,5	0,5	1,2	1,9	73,8	7,0
23	11,9	11,5	0,4	23,8	7,6	12,0	4,2	12,5	7,4	6,7	3,4	2,6	2,4	0,4	3,0	0,6	3.1	3,5	69,4	6,8
24	6,7	8,8	0,5	16,0	7,7	11,1	6,0	13,9	7,6	6,3	4,7	0,5	6,1	1,7	4,1	0,9	2,3	3,2	76,1	7,9
25	11,1	12,1	0,7	23,9	7,5	12,4	4,1	11,2	6,2	6,7	4,3	3,0	3,8	1,6	4,4	0,5	1,4	0,7	67,9	8,2
26	12,3	10,4	0,7	23,4	8,3	13,9	4,4	9,5	6,7	7,2	4,1	2,3	5,2	1,5	3,0	0,6	1,8	2,1	70,6	6,0
27	12,2	11,0	0,9	24,2	8,3	14,0	5,2	10,4	6,4	6,0	3,8	1,1	4,8	0,9	3,2	0,4	2,6	2,1	69,2	6,7
28	8,4	14,1	0,5	23,0	8,5	16,9	3,5	12,5	5,8	5,2	3,8	0,4	5,8	0,4	3,0	0,9	3,2	1,9	71,9	5,1
32	7,6	11,6	0,2	19,4	8,0	12,2	4,0	11,8	7,6	8,9	4,9	2,3	4,6	1,6	3,5	0,8	1,7	1,7	73,6	7,0
33	8,9	12,4	0,5	21,8	7,8	13,7	4,1	12,4	5,2	4,9	3,5	1,8	5,7	1,3	1,7	0,3	3,5	2,8	69,0	9,2
34	11,4	12,5	0,4	24,3	8,0	12,6	4,9	12,0	4,8	5,1	3,3	1,7	5,6	0,5	1,5	0,2	4,4	4,3	68,8	6,9
35	9,2	11,2	0,5	20,9	8,2	12,5	5,6	13,0	6,5	8,5	5,0	1,7	4,4	0,9	1,9	0,4	1,6	0,5	70,6	8,5
36	9,2	10,9	0,4	20,5	6,6	11,1	5,5	14,8	7,3	8,7	5,0	1,6	5,0	0,4	1,8	0,4	1,8	0,9	70,5	9,0
37	7,2	10,4	0,4	18,0	9,0	15,8	6,1	13,1	4,5	6,2	4,1	1,0	4,3	0,2	3,0	1,0	2,3	1,9	72,8	9,2
38	11,1	10,9	0,6	22,6	6,7	13,7	6,5	11,3	7,8	9,5	5,6	1,3	2,9	1,5	1,5	0,3	0,9	1,4	70,9	6,5
39	12,3	11,5	0,9	24,7	7,4	13,3	4,3	10,8	7,0	8,4	5,5	1,5	3,5	1,7	2,4	0,7	1,2	1,6	69,3	6,0
40	15,2	12,4	0,7	27,3	6,3	13,5	4,9	11,7	7,0	7,2	4,1	1,0	2,9	1,7	2,3	0,6	1,1	0,9	65,2	7,5
47	11,2	9,8	0,2	21,2	6,1	10,9	5,5	12,0	7,1	10,2	5,1	2,2	2,8	1,9	5,7	0,4	0,9	0,7	71,5	7,3
48	10,5	9,0	0,4	19,9	7,6	10,7	6,4	13,1	7,2	7,5	5,5	1,9	4,9	1,4	3,7	0,5	1,2	1,9	72,7	7,4
49	12,0	7,9	0,5	20,4	6,7	10,8	5,7	11,4	7,4	8,5	5,6	2,1	4,6	1,5	3,7	0,5	2,4	2,4	73,5	6,1
50	10,9	10,3	0,5	21,7	5,7	11,3	4,7	13,0	6,9	7,5	5,3	1,3	2,9	0,6	4,8	0,5	2,8	2,6	69,9	8,4
2417	9,1	8,1	0,7	17,9	7,9	10,9	6,4	11,6	7,9	8,9	5,1	2,4	4,4	2,1	4,6	1,4	1,0	1,4	76,0	6,1
2418	8,1	6,2	0,5	14,8	9,7	13,2	5,1	13,9	7,7	6,5	3,8	1,8	6,2	2,0	3,4	0,2	1,2	2,3	77,4	7,8
2419	10,4	7,6	0,3	18,3	5,5	10,1	6,6	14,3	7,5	5,9	4,3	3,4	4,9	1,6	3,5	1,6	1,7	3,1	74,0	7,7
2420	11,0	9,4	0,3	20,7	7,8	13,8	4,5	13,5	7,1	7,2	5,1	—	5,0	1,7	2.3	1,2	2,1	2,3	73,6	5,7

Ann. agron., 1969, **20** (1), 61-88.

DOSAGE DES CARBONATES DANS LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES DE QUELQUES SOLS CALCAIRES ET DOLOMITIQUES

M. DUPUIS

Laboratoire de Géologie,
École nationale supérieure agronomique,
Centre de Recherches agronomiques du Midi, 34 - Montpellier,
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

L'auteur a recherché si la détermination des carbonates et des cations Ca^{++} et Mg^{++} dans les fractions granulométriques de la terre fine pouvait constituer un critère de caractérisation des sols calci-magnésiques.

Après mise au point d'une méthode, celle-ci a été appliquée à divers sols sur matériaux calcaires et dolomitiques.

La discussion des résultats met en évidence diverses corrélations et montre que la plupart des résultats obtenus sont valables, malgré l'imperfection des techniques analytiques, et bien que l'on note, dans certains cas, des écarts expérimentaux importants liés pour une part à la nature du matériau originel.

Les variations du taux de carbonates et du rapport Ca^{++}/Mg^{++} permettent une différenciation fine du sol à l'échelon du profil, voire de l'horizon pédologique.

La méthode proposée pourrait apporter une contribution à la classification des sols calci-magnésiques et à l'étude de leur genèse.

INTRODUCTION

L'idée initiale de la présente étude était de rechercher une base de discrimination possible entre rendzines et sols bruns calcaires, à partir de la teneur en carbonates des fractions granulométriques et, plus spécialement, de la fraction 0-2 μ.

Jusqu'à présent, le principe du dosage fractionné des carbonates ne semble pas avoir été systématiquement exploité dans une optique pédologique mais plutôt pour caractériser l'état calcique des sols (GACHON, 1963) ou étudier la dynamique des cations échangeables (SHIELDS et MEYER, 1964). Ces derniers auteurs établissent que le taux de carbonates de la fraction 0-2 μ peut varier considérablement selon le matériau originel.

Pour cette étude, la calcimétrie s'est révélée insuffisamment sensible et fidèle ; l'acidimétrie paraît mieux adaptée à la mesure de teneurs parfois faibles, sur des prises d'essai réduites et dans des matériaux pouvant contenir de la dolomie.

Les premières déterminations n'ont pas justifié la poursuite de l'idée initiale ; par contre, elles ont montré qu'à défaut de discrimination entre rendzines et sols bruns calcaires, le dosage des carbonates dans les fractions granulométriques pouvait permettre une caractérisation plus poussée des profils étudiés et que l'intérêt en serait accru si l'on dosait également le calcium et le magnésium entrant dans la composition des carbonates.

La technique analytique a été adaptée en conséquence.

L'ensemble des résultats a été étudié statistiquement afin de préciser la validité de la méthode ; diverses corrélations ont pu être mises en évidence.

Sur ces bases, on s'est attaché à dégager la signification pédologique des chiffres obtenus.

I. — PRINCIPALES RÉFÉRENCES DES SOLS ÉTUDIÉS

Les sols étudiés proviennent de périmètres prospectés par le Service d'Étude des Sols de Montpellier, l'un en Corrèze, région de Meyssac (Bonfils, 1966), l'autre dans l'Aveyron, région de Roquefort (Servat et Naert, 1966).

Dans l'ensemble, les profils choisis sont typiques d'unités pédologiques ou séries largement représentées sur le terrain. Ils se rattachent aux principaux groupes de la classe des sols calcimagnésiques : rendzines, sols bruns calcaires et crypto-rendzines (rendzines dolomitiques).

Ces profils, qui correspondent à des aires géographiques différentes, représentent des sols assez variés, tant du point de vue pédogénétique que du point de vue stratigraphique et pétrographique.

De ce fait, ils présentent une gamme étendue de teneurs en carbonates totaux et des rapports Calcium/Magnésium suffisamment diversifiés, ce qui est important pour tester les techniques mises au point.

Les principales références relatives à ces sols figurent dans les tableaux 1 et 2. Le tableau 1 regroupe les sols où n'ont été dosés que les carbonates ; le tableau 2, les sols où ont été dosés en outre le calcium et le magnésium.

II. — TECHNIQUES ANALYTIQUES

Compte tenu de l'objectif de l'étude, la méthode utilisée comporte deux aspects bien distincts ;

— séparation des fractions granulométriques de la terre fine *sans destruction* des carbonates ;

— dosage des carbonates totaux, ainsi que des cations Ca^{++} et Mg^{++} entrant dans la composition de ceux-ci : sur la terre fine d'une part, sur chaque fraction granulométrique d'autre part.

TABLEAU I. — *Principales références des sols étudiés - Dosage des carbonates seuls*
Meyssac et Roquefort

Profil	Matériau et statigraphie	Série	Type génétique	Horizon	Carbonates totaux p. 100 (en $CaCO_3$)	Calcaire actif p. 100
	Périmètre de Meyssac					
307	Marno-calcaire (Toarcien)		Sol brun calcaire colluvionné à pseudogley	0-15 20-40	25,5 39,4	11,0 24,0
310	Marno-calcaire (Toarcien)		Sol brun calcaire	0-20 60-80	36,0 37,2	19,0 20,0
315	Calcaire marneux (Hettangien)		Sol brun calcaire	0-20 20-30	17,8 25,1	3,0 4,0
316	Calcaire marneux (Hettangien)		Sol brun calcaire	0-20 30-40	45,5 48,6	6,0 8,0
323	Calcaire marneux (Hettangien)		Sol brun calcaire	0-15 40-50	68,0 91,2	5,0 7,0
	Périmètre de Roquefort					
84	Marnes noires (Domérien)	Laumière	Sol brun calcaire	0-15 60-80	13,3 29,6	4,5 7,5
81	Calcaire marneux (Pliensbachien infér.)	Nayac	Sol brun calcaire	0-15 15-30	53,5 53,0	10,5 11,0
94	Dolomie ferrugineuse (Sinémurien)	Cadenède	Rendzine dolomitique	0-15 20-30	9,3 25,0	1,0 3,0
56	Marno-calcaire du Sommet de l'Hettangien	La Vayssière	Rendzine blanche	0-10 30-40	18,0 50,5	4,0 12,5
8	Calcaire marneux interstratifié de dolomie (Hettangien moyen)	Borie Blanque	Rendzine dolomitique « bariolée »	0-20 20-40	40,1 45,1	1,5 1,5

TABLEAU 2. — *Principales références des sols étudiés - Dosage des carbonates et des cations Ca^{++} et Mg^{++}*
Roquefort (suite)

Profil	Matériau et stratigraphie	Série	Type génétique	Horizon	Carbonates totaux ($CaCO_3$ %)	Calcaire actif p. 100	$CaCO_3$ p. 100	$MgCO_3$ p. 100
							calculés d'après Ca et Mg	
	Périmètre de Roquefort (suite)							
13	Calcaire cristallin en plaquettes (Callovien-Bathonien)	La Devèze	Rendzine rouge	0-10 30-40	34,8 44,8	3,0 3,5	24,2 33,3	8,4 8,4
118	Dolomie cristalline (Bajocien inférieur)	Combalou	Sol brun calcique ou pararendzine	0-25 > 85	0,5 0,3	— —	0,5 0,5	0,4 —
137	Marnes noires (Aalénien inférieur)	Caoumillas	Rendzine	0-15	13,0	—	11,5	0,7
115	Colluvion de marnes noires (Toarcien)	Laumière	Sol brun calcaire colluvial	0-20 20-80 80-120	7,5 12,5 15,0	0,5 2,0 —	4,5 10,0 11,8	9,5 1,8 2,5
155	Colluvion de marnes noires et cailloutis bajocien	Tournemire	Sol brun calcaire colluvial à charge dolomitique	0-30 > 30	51,7 50,5	5,5 6,0	46,0 46,8	4,2 3,5
30	Schistes cartons (Toarcien inférieur)	Moussac	Xérorendzine	0-15	26,5	11,0	27,5	0,4
83	Dolomies et Marnes interstratifiés (Pliensbachien supérieur)	Lauras	Pararendzine dolomitique	0-25 25-40	4,7 2,5	0,5 0,5	1,5 1,3	1,1 0,4
90	Marno-calcaire (Pliensbachien moyen)	Malevieille	Rendzine brun-rouge argileuse	0-20 20-35	18,8 10,8	3,0 2,5	18,3 9,0	0,4 0,7
95	Calcaire marneux (Pliensbachien inférieur)	Nayac	Rendzine blanche modale	0-20 20-30	59,5 55,8	10,5 9,5	56,0 52,5	1,1 0,7
97	Calcaire compact (Sinémurien supérieur)	Le Casse	Rendzine rouge limoneuse	0-25	9,5	1,5	7,8	1,8
102	Calcaire dolomitique (Sinémurien)	Cadenède	Rendzine dolomitique rouge sablo-limoneuse	0-10 10-40 40-50	24,5 7,5 6,5	0,5 0,5 1,0	13,2 3,5 2,8	8,8 3,2 2,5
106	Dolomie gréseuse (Sinémurien inférieur)	Crassous	Rendzine dolomitique rouge sableuse	0-15 15-40 > 40	74,5 86,3 99,5	1,5 1,5 —	40,3 44,5 50,8	27,0 32,6 41,0
108	Marno-calcaire (Hettangien supérieur)	La Vayssière La Borie	Rendzine grise	0-20 20-30	69,3 70,3	4,5 5,0	38,8 40,8	23,8 22,4
2	Dolomie marneuse (Hettangien moyen)	Blanque	Rendzine dolomitique bariolée	0-15	51,3	3,5	28,3	19,3

A. — *Séparation des fractions granulométriques*

La séparation se fait selon la technique classique. Sur une prise d'essai déterminée en fonction de la texture, la matière organique est détruite par traitements successifs à l'eau oxygénée à *20 volumes*, le premier traitement se faisant par contact, sans chauffage, pendant une nuit.

Les ions floculants sont échangés par KCl en solution 0,1 N, puis 0,01 N, l'excès de KCl étant éliminé par lavage à l'eau.

La mise en dispersion est obtenue par agitation (2 heures), en présence d'hexamétaphosphate de sodium (40 ml de solution à 50 g/l) avec addition d'ammoniaque (1 ml) pour maintenir un pH supérieur à 9,0 dans la suspension.

Les fractions 0-2 μ et 2-20 μ sont recueillies séparément et en totalité, en répétant les siphonnages. La fraction 0-2 μ est floculée par le minimum de KCl, centrifugée, séchée.

Les fractions 20-50 μ, 50-200 μ et 200 μ-2 mm sont séparées par tamisage à sec. Chacune des fractions ainsi séparées est pesée et conservée en vue des dosages ultérieurs.

B. — *Dosages des carbonates totaux*

Utilisée au cours d'essais préliminaires, la calcimétrie volumétrique (Calcimètre Bernard) n'a pas donné satisfaction. Sur la fraction 0-2 μ, le dégagement de CO_2 est très faible, d'où une imprécision considérable des mesures.

Sur les fractions sableuses : ou bien la prise d'essai est très faible, ou bien elle contient de la dolomie et, dans ce cas, l'attaque est très lente (plusieurs heures) et souvent incomplète, l'opération se faisant à froid. Dans les deux cas, l'erreur commise est importante.

En conséquence, l'acidimétrie a été expérimentée. La technique adoptée est inspirée de celle de l'U. S. Salinity Laboratory (1954).

Le principe de la mesure est le suivant : une prise d'essai est attaquée par un volume exact d'une solution acide titrée. L'excès d'acide restant est titré en retour par une solution basique et la différence est censée représenter l'acide utilisé pour la décomposition des carbonates.

Protocole.

Un g de terre fine (préalablement broyée et passée quantitativement au tamis de 0,200 mm) ou 1 g de fraction granulométrique — en fait, souvent la totalité de celle-ci — est attaquée par un volume exactement mesuré, en général 20 ml, d'une solution d'acide chlorhydrique N dans une fiole conique.

Le volume est amené à 100 ml environ et l'attaque effectuée à chaud vers 60°, certains carbonates étant peu attaqués à froid. Pour certaines dolomies cristallines, cette opération peut durer 45 minutes.

L'attaque terminée, une ébullition ménagée est maintenue quelques minutes pour éliminer CO_2 de la solution.

Après refroidissement, le surnageant est filtré et le résidu lavé jusqu'à l'obtention de 200-220 ml de filtrat, volume reconnu suffisant pour qu'il ne reste pas trace d'acide sur le filtre.

Le titrage en retour s'effectue soit sur la totalité du filtrat (carbonates seuls), soit, si l'on dose également les cations, sur une aliquote (200 ml) après avoir amené à volume connu (250 ml).

La liqueur alcaline : NaOH N ou 0,5 N, est versée jusqu'à virage de la phénolphtaléine (solution hydroalcoolique à 1 p. 100), la teinte devant rester stable 20 secondes au moins.

Par différence avec le dosage à blanc, on obtient la quantité d'acide utilisée pour décomposer les carbonates. Les résultats exprimés en $CaCO_3$ sont ramenés à 100 de terre fine, ou de fraction granulométrique.

L'étalonnage est effectué avec des quantités connues de $CaCO_3$ pur précipité. Dans ces conditions: 1 ml ClH N correspond à 1 milliéquivalent, soit 50 mg $CaCO_3$ ou 30 mg CO_3^{--}.

Remarque.

L'attaque acide affecte vraisemblablement d'autres constituants que les carbonates : certains peuvent introduire un facteur de surestimation de l'acide consommé ; d'autres ne gênent pas : ainsi, les sels de fer précipitent et n'interfèrent pas sur le titrage (JACKSON, 1958).

C. — *Dosage du calcium et du magnésium*

Le dosage des carbonates par acidimétrie est assez classique, quoique peu utilisé pour les sols. La modification la plus saillante consiste à doser sur le même extrait l'acidité résiduelle et les cations Ca^{++} et Mg^{++} libérés par l'attaque acide.

Ces cations, qui sont censés provenir des carbonates sont dosés par complexométrie au moyen d'une solution titrée de sel disodique de l'acide éthylène-diamine-tétra-acétique, le milieu étant tamponné à pH > 10.

Protocole.

Sur deux aliquotes distinctes (10 ml en règle générale, mais des dilutions sont parfois nécessaires) provenant du filtrat de l'attaque acide, on dose respectivement (Ca^{++}) et la somme ($Ca^{++} + Mg^{++}$).

Les ions gênants (Al^{3+}, Ti^{++}, Fe^{3+}, Fe^{++}) sont inhibés par le cyanure de potassium (sol. aqueuse à 1 p. 100) et la triéthanolamine (sol. aqueuse à 33 p. 100).

Le titrage complexométrique est effectué avec une solution titrée (0,02 N) et étalonnée de Complexon III (burette automatique au 1/100 ml).

Pour Ca^{++}, le milieu est tamponné à pH 12,5 avec une liqueur concentrée de soude ; l'indicateur utilisé est le Noir Bleu de Chrome. La présence de Mg^{++} est indispensable à une bonne appréciation du virage.

Pour ($Ca^{++} + Mg^{++}$), le tampon utilisé est le chlorure d'ammonium ammoniacal, avec, comme indicateur, le Noir Ériochrome T.

Mg^{++} est obtenu par différence entre le titrage ($Ca^{++} + Mg^{++}$) et le titrage (Ca^{++}).

Les résultats sont exprimés soit en pourcentage soit, de préférence, en milliéquivalents par gramme (me/g) de terre fine ou de fraction granulométrique analysée.

D. — *Expression et présentation des résultats*

Pour chaque échantillon analysé, les techniques analytiques décrites ont été appliquées respectivement à la terre fine globale et à chaque fraction granulométrique séparément, en vue de déterminer ce que l'on admet, jusqu'à plus ample discussion, être les *carbonates totaux* et les cations *calcium et magnésium des carbonates*, dans les profils où ces cations ont été dosés.

Les carbonates ont été dosés comparativement par acidimétrie et calcimétrie sur la terre fine ; cette comparaison n'est pas possible sur les fractions granulométriques, quantitativement insuffisantes.

Les carbonates totaux sont exprimés conventionnellement en $CaCO_3$ rapporté à cent de terre fine, ou de fraction granulométrique. En fait, la plupart des sols étant au moins légèrement magnésiens et certains étant dolomitiques, le chiffre obtenu ne

représente pas la somme ($CaCO_3 + MgCO_3$), ces deux sels ayant des masses moléculaires différentes ; l'expression sous forme d'anion CO_3^{--} serait plus logique, quand on ne dispose pas des teneurs en calcium et magnésium.

Les données analytiques obtenues ont été traduites graphiquement :

— dosage comparatif des carbonates par calcimétrie et acidimétrie (fig. 1) ;

— taux de carbonates obtenus comparativement par dosage global sur terre fine et par cumul des fractions (fig. 2) ;

— taux de cations obtenus respectivement par dosage global sur terre fine et par cumul des fractions (fig. 3) ;

— taux de CO_3^{--} calculé à partir de Ca^{++} et Mg^{++} (supposés combinés à l'état de carbonates) et taux de CO_3^{--} mesuré par acidimétrie (fig. 4) ;

— teneurs en milliéquivalents Ca^{++} et Mg^{++} par gramme de fraction granulométrique et teneurs en carbonates totaux p. 100 de chaque fraction (fig. 5 à 12) ;

— teneurs en carbonates des fractions granulométriques, rapportés aux carbonates totaux de l'échantillon (fig. 13) pour certains profils.

III. — DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CRITIQUE DE LA MÉTHODE

Les résultats obtenus suggèrent donc des rapprochements et des comparaisons :

a) entre calcimétrie et acidimétrie (dosage des carbonates) ;

b) entre teneur en carbonates mesurée globalement sur la terre fine et teneur calculée par cumul des fractions ;

c) entre teneurs en calcium et magnésium, mesurées globalement sur la terre fine et teneurs calculées par cumul des fractions ;

d) entre teneurs en anion CO_3^{--} mesurées par acidimétrie et teneurs en CO_3^{--} calculées, en supposant que les cations Ca^{++} et Mg^{++} soient entièrement combinés à l'état de carbonates.

A. — *Comparaison entre calcimétrie et acidimétrie* (fig. 1)

Elle porte uniquement sur les carbonates de la terre fine, préalablement broyée et passée quantitativement au tamis de 0,2 mm.

Les calculs de corrélation et de régression donnent les résultats suivants (x correspondant aux dosages de carbonates par calcimétrie volumétrique, y aux dosages par acidimétrie) :

équation de régression	$y = 0{,}92x + 4{,}5$
coefficient de corrélation	$r = 0{,}97$
erreurs d'estimation σ_{Dyx}	6,852
— σ_D	1,033
— σ_{byx}	0,037

La corrélation est hautement significative dans les deux cas (t calculé $> t$ des tables ; $P < 0{,}005$) mais on observe pour certains échantillons des écarts supérieurs aux marges d'erreurs admissibles et se manifestant soit en plus soit en moins.

Les raisons de ces divergences peuvent être les suivantes :

1. L'acidimétrie se ramène à un dosage global d'acidité résiduelle. Or, une part faible mais non négligeable de l'acide consommé a pu être neutralisée par des constituants non carbonatés, d'où surestimation des carbonates.

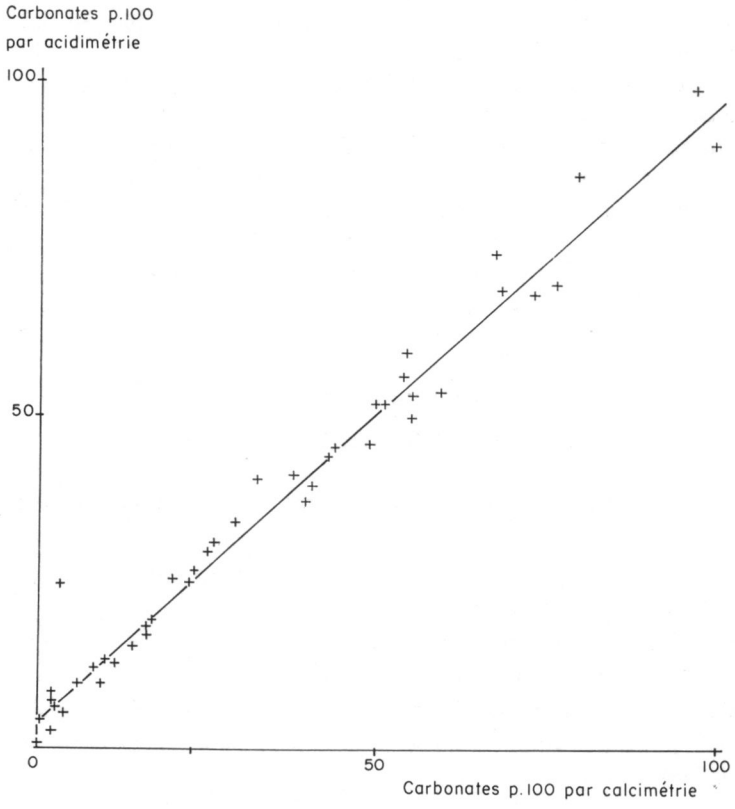


FIG. 1. — *Relation entre les carbonates totaux de la terre fine dosés par calcimétrie et par acidimétrie*

2. La calcimétrie a été effectuée à froid : dans ces conditions l'attaque de la dolomie est plus ou moins rapide et plus ou moins poussée selon le degré de finesse. Il en résulte une sous-évaluation des carbonates, variable d'ailleurs suivant les proportions relatives de calcaire et de dolomie (d'où l'intérêt d'individualiser ces constituants).

Ces raisons, jointes aux causes d'erreurs inhérentes aux deux techniques, expliquent pour une large part les écarts constatés. La calcimétrie est en tout cas très aléatoire dans les sols dolomitiques.

B. — *Comparaison entre teneur en carbonates mesurée globalement sur la terre fine et teneur calculée par cumul des fractions*

La teneur en carbonates de la terre fine représente en principe la somme des taux de carbonates contenus dans les diverses fractions. En d'autres termes, si (C_T) est la

teneur globale en carbonates de la terre fine, (C_i) la teneur d'une fraction granulométrique (i), (f_i) l'effectif de cette fraction, on devrait avoir

$$C_T = \Sigma\ (C_i \times f_i)$$

ce qui n'est pas le cas (fig. 2). Les calculs de corrélation et de régression, avec x pour le taux de carbonates obtenus par dosage direct, y pour le taux obtenu par cumul des fractions, ont donné les résultats suivants :

équation de régression.....	$y = 0{,}98x - 1{,}5$
coefficient de corrélation	$r = 0{,}99$
erreurs d'estimation σ_{Dyx}	3,474
— σ_D	0,509
— σ_{byx}	0,020

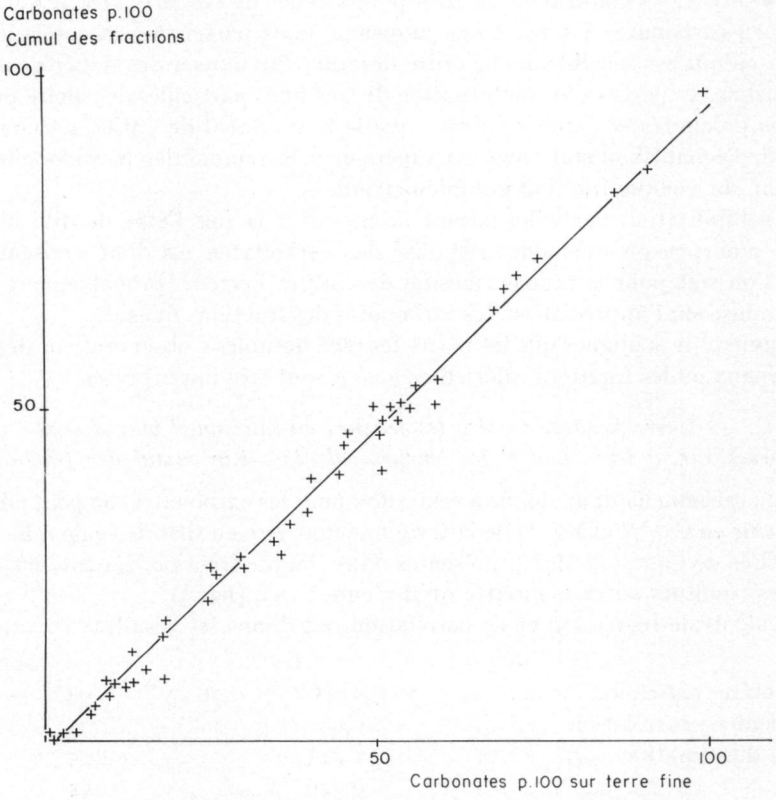


FIG. 2. — *Relation entre les carbonates totaux obtenus par dosage sur la terre fine* (C_T) *et par cumul des fractions* $\Sigma\ (C_i \times f_i)$

La corrélation est positive et hautement significative, mais avec des écarts expérimentaux parfois supérieurs aux erreurs d'estimation admissibles, et presque toujours dans le même sens : la teneur en carbonates calculée, par cumul des fractions, accuse un déficit par rapport à la teneur mesurée globalement sur terre fine. Ce déficit est important sur les matériaux marneux, beaucoup moindre sur les calcaires cristallins et les matériaux dolomitiques.

Les écarts systématiques ne paraissent imputables ni à la technique de dosage des carbonates, qui est la même pour la terre fine et les fractions, ni à l'erreur analytique sur cette détermination, qui oscille autour de 2 à 3 p. 100, ni à une séparation défectueuse des fractions granulométriques, qui, en toute hypothèse, ne permet pas de justifier les écarts constatés.

Reste la possibilité d'une solubilisation partielle des carbonates au cours des traitements précédant la séparation granulométrique (1) notamment les traitements à l'eau oxygénée (BOURGET et TANNER, 1953 ; ANDERSON, 1963).

Si l'on calcule l'équivalence en carbonates des cations Ca^{++} et Mg^{++} présents dans le filtrat des lavages KCl, les valeurs trouvées sont sensiblement du même ordre de grandeur que le déficit constaté (évaluation approximative car elle englobe des ions Ca^{++} et Mg^{++} provenant de l'échange avec K^{+}).

Ces observations confirment en tous points celles de GACHON (1963) qui évalue les pertes en carbonates à 1 p. 100 en moyenne, mais parfois à 3 et 4 p. 100 de la terre fine (ce qui est sensiblement l'ordre de grandeur moyen des déficits constatés ici). Il attribue ces pertes à la solubilisation de très fines particules de calcite pure des carbonates précipités et explique ainsi « que le taux global de $CaCO_3$ mesuré directement sur l'échantillon soit toujours supérieur à la somme des mesures effectuées séparément sur chaque fraction granulométrique ».

Une solubilisation partielle, faisant intervenir à la fois l'état de division et le caractère amorphe ou finement cristallisé des carbonates, est donc vraisemblable, sans que l'on soit pour autant en mesure de chiffrer l'erreur, probablement importante, commise sur l'appréciation des carbonates des fractions fines (2).

Il convient de souligner que les pertes les plus notables s'observent sur des matériaux marneux où les fractions inférieures à 20 μ sont très importantes.

C. — *Correspondance entre les teneurs en calcium et magnésium mesurées sur la terre fine et les teneurs calculées par cumul des fractions*

Par un raisonnement analogue à celui suivi pour les carbonates, on peut admettre que la teneur en Ca^{++} (ou Mg^{++}) de la terre fine doit être en théorie égale à la somme des quantités de Ca^{++} (ou Mg^{++}) présentes dans chaque fraction. La traduction graphique des résultats obtenus montre qu'il n'en est rien (fig. 3).

Les calculs de régression et de corrélation ont donné les résultats suivants :

	Ca^{++}	Mg^{++}
équation de régression	$y = 1{,}05\,x + 0{,}70$	$y = 1{,}04\,x - 0{,}07$
coefficient de corrélation	0,99	0,99
erreurs d'estimation σ_{Dyx}	1,225	0,265
— σ_D	0,240	0,051
— σ_{byx}	0,034	0,016

x correspondant aux teneurs obtenues par cumul des fractions, y aux teneurs trouvées sur la terre fine.

(1) De fait, en traitant CO_3Ca pur précipité séparément par chacun des réactifs utilisés, nous avons constaté que la solubilité dans H_2O_2 à 20 volumes et dans l'hexamétaphosphate n'est pas négligeable ; elle est faible dans KCl. En opérant dans les conditions expérimentales de l'analyse granulométrique, la perte globale en CO_3Ca est de l'ordre de 250 mg sur une prise de 5 g de carbonate pur précipité.

(2) Des essais en cours semblent toutefois montrer que la dispersion par ultra-sons, en présence d'ammoniaque et sans aucun traitement préalable, conserve intégralement les carbonates des fractions fines (< 20 μ). Aux erreurs d'expérience près, on retrouve par cumul des fractions la teneur en carbonates globale de la terre fine.

Comme dans les cas précédents, la corrélation est positive et hautement significative, mais avec des écarts expérimentaux dépassant largement les limites admissibles. La dispersion des résultats, très marquée aux faibles teneurs, semble plus accusée pour Ca^{++} que pour Mg^{++}, ce qui peut s'expliquer par des différences de solubilité entre carbonates calciques et magnésiens, d'où pertes moindres pour ces derniers à la séparation granulométrique.

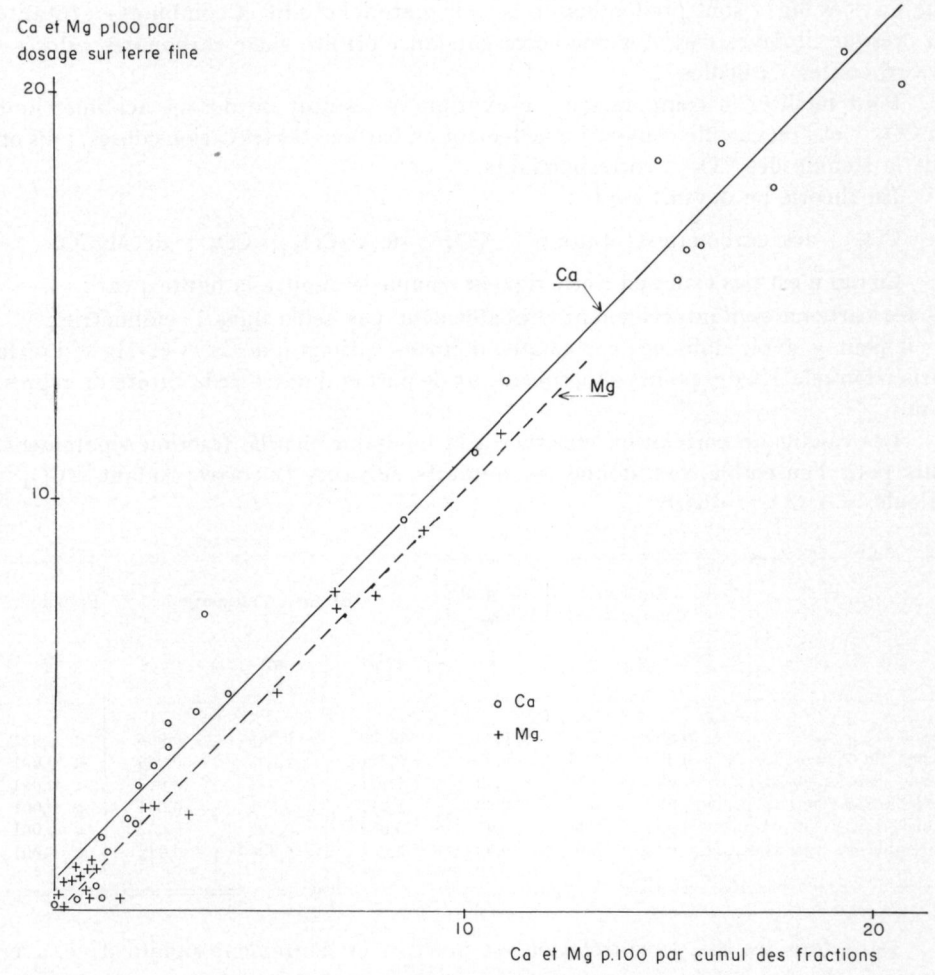


FIG. 3. — *Relations entre les teneurs en Ca^{++} et Mg^{++}, obtenues respectivement par cumul des fractions et par dosage sur la terre fine*

(Roquefort II)

Aux pertes de cations viennent d'ailleurs s'ajouter les erreurs propres au dosage complexométrique.

D. — *Correspondance entre CO_3^{--} dosé par acidimétrie et CO_3^{--} calculé à partir des cations*

Cette correspondance a été étudiée à partir des dosages de carbonates totaux et de cations Ca^{++} et Mg^{++} effectués sur les fractions granulométriques.

Si l'on admet que dans l'acidimétrie la part dévolue aux constituants non carbonatés est négligeable par rapport à celle des carbonates, si l'on admet par ailleurs que Ca^{++} et Mg^{++} sont prédominants dans le matériel étudié et combinés en totalité ou presque, il devrait exister une correspondance étroite entre carbonates « dosés » et carbonates « calculés ».

Pour faciliter la comparaison, on exprime le résultat du dosage acidimétrique en CO_3^{--} et l'on calcule conventionnellement en carbonates les cations dosés, puis on fait la somme des CO_3^{--} correspondants.

En théorie on devrait avoir :

$$CO_3^{--} \text{ des carbonates totaux} = CO_3^{--} \text{ de } CaCO_3 + CO_3^{--} \text{ de } MgCO_3$$

Ce qui n'est pas exact en toute rigueur comme le montre la figure 4 car :
— les carbonates n'interviennent probablement pas seuls dans l'acidimétrie ;
— il peut y avoir dans ces carbonates d'autres cations que Ca^{++} et Mg^{++} d'où la dispersion relative des points expérimentaux de part et d'autre de la droite de régression.

Les calculs de corrélation effectués à la fois pour chaque fraction séparément, puis pour l'ensemble, ont donné les résultats suivants (x correspondant à CO_3^{--} calculé, y à CO_3^{--} dosé) :

	Équation de régression	Coeff. de corrélation	Erreurs d'estimation			Probabilité
	$y =$	r	σD_{yx}	σD	σb_{yx}	P
Argile 0-2 μ.....	$0{,}80\,x + 0{,}57$	0,93	0,339	0,069	0,066	< 0,001
Limon fin 2-20 μ	$0{,}95\,x + 1{,}51$	0,95	5,321	1,026	0,066	< 0,001
Limon grossier 20-50 μ....	$1{,}03\,x + 0{,}10$	0,99	1,831	0,359	0,017	< 0,001
Sable fin 50-200 μ	$1{,}01\,x + 0{,}70$	0,99	3,012	0,591	0,031	< 0,001
Sable grossier 200 μ-2 mm	$0{,}98\,x + 1{,}19$	0,97	5,059	0,992	0,052	< 0,001
Ensemble des fractions....	$1{,}02\,x + 0{,}03$	0,99	5,031	0,986	0,022	< 0,001

Dans tous les cas, la corrélation est positive et hautement significative, avec toutefois des écarts expérimentaux parfois importants. De plus, on constate des variations dans les valeurs du coefficient de corrélation et des erreurs d'estimation.

La plus grande dispersion des résultats est observée pour la fraction 0-2 μ où les teneurs en carbonates et en cations Ca^{++} et Mg^{++} sont faibles, donc l'acidimétrie moins précise et les dosages complexométriques plus aléatoires.

Pour la fraction sableuse grossière, où les teneurs en carbonates et cations sont généralement élevées, la prise d'essai disponible est souvent faible, ce qui introduit une erreur d'appréciation.

Nonobstant ces réserves, la concordance paraît assez bonne dans l'ensemble et l'on peut admettre que la méthode utilisée donne une idée acceptable de la répartition des carbonates et de leur composition.

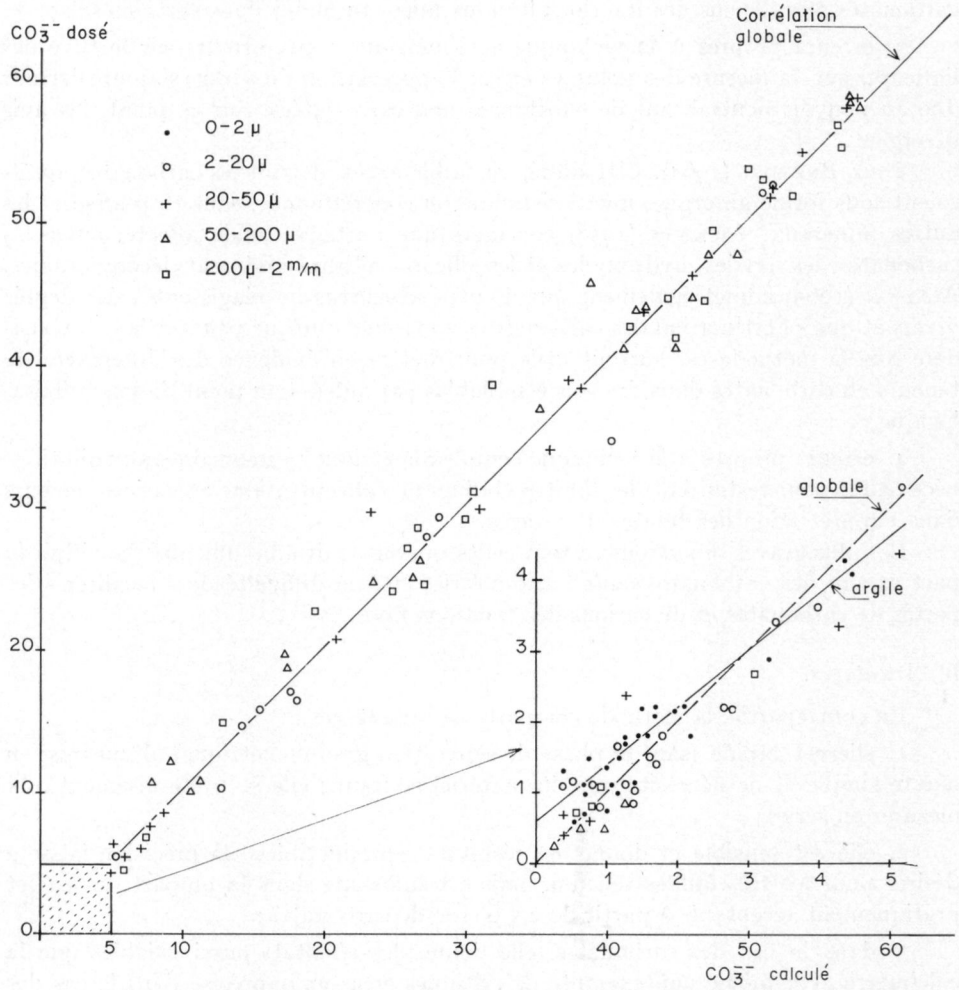


FIG. 4. — *Relation entre CO_3^{--} calculé à partir des cations Ca^{++} et Mg^{++} et CO_3^{--} dosé par acidimétrie*
Cartouche : valeurs comprises entre 0 et 6 p. 100

E. — *Critique de la méthode*

a) *Principaux inconvénients.*

La méthode utilisée présente divers inconvénients, tels par exemple le manque de spécificité du réactif d'attaque vis-à-vis des carbonates, ou le manque de précision de la technique complexométrique pour les cations. Elle comporte, par ailleurs, de nombreuses causes d'erreurs :

1. erreurs d'échantillonnage et erreurs sur les prises aux divers stades de l'analyse;

2. erreurs propres à la technique de l'analyse granulométrique (dans le cas de séparation des fractions) : erreurs dues aux conditions de dispersion et aux décantations, erreurs dues aux tamisages, mais surtout erreur systématique par perte de carbonates aux dépens des fractions les plus fines, au moins dans certains sols ;

3. erreurs propres à la technique acidimétrique : aux erreurs sur le titre des liqueurs, sur la mesure des volumes et sur l'appréciation du virage s'ajoute l'erreur due au pouvoir neutralisant de substances non carbonatées. Sur ce point, les avis divergent.

Pour BREWER (1964), ClH dilué, en faible excès, détruit les carbonates, qu'ils soient sous forme amorphe, microcristalline ou concrétionnée, sans trop affecter les autres minéraux. JACKSON (1958) considère que l'attaque acide affecte, outre les carbonates, les oxydes, hydroxydes et les silicates alcalins aisément décomposables. ALLISON (1965) admet également que d'autres constituants réagissent à des degrés divers et que « l'estimation des carbonates s'en trouve quelque peu forcée ». Il considère que la méthode est surtout utile pour mettre en évidence des différences de teneurs en carbonates dans des sols semblables par ailleurs au point de vue minéralogique ;

4. erreurs propres à la technique complexométrique : erreurs dues aux dilutions nécessaires pour rester dans les limites voulues de concentrations en cations, erreurs dans l'appréciation des teintes de virages.

Les plus graves objections restent celles qui ont trait à la difficulté de définir la part exacte des carbonates dans l'acidimétrie, et à la difficulté de « localiser » les pertes de carbonates et de cations des fractions fines.

b) *Avantages.*

En contrepartie, la méthode comporte des avantages :

1. elle est rapide (sauf la phase de séparation granulométrique), d'une mise en œuvre simple et ne nécessite que du matériel courant ; elle se prête aisément aux mesures en séries ;

2. elle est sensible et donne des résultats reproductibles ; la précision laisse à désirer pour les très faibles teneurs, mais est suffisante dans la plupart des cas et pratiquement acceptable à partir de 2,5 p. 100 de carbonates ;

3. dans le cas des carbonates, elle donne des résultats aussi valables que la calcimétrie, elle-même non exempte de critiques et assez imprécise dans le cas des sols à faibles teneurs en carbonates ou des sols contenant de la dolomie. Par ailleurs, elle permet d'individualiser les carbonates en CO_3Ca et CO_3Mg, d'apprécier les taux respectifs de Ca^{++} et de Mg^{++} avec une approximation suffisante pour autoriser une interprétation pédologique.

IV. — SIGNIFICATION DES COURBES DE RÉPARTITION GRANULOMÉTRIQUE DES CARBONATES ET DES CATIONS Ca^{++} ET Mg^{++}

La traduction graphique des dosages de carbonates totaux (*a*) et de cations Ca^{++} et Mg^{++} (*b*) dans les fractions granulométriques aboutit, pour chaque profil,

au tracé d'une famille de courbes (fig. 5 à 12) dont l'ensemble donne une vue synthétique de la distribution des constituants considérés.

Ces courbes, dont chacune exprime les variations d'un constituant donné dans un horizon donné, en fonction des classes de grosseurs de particules, se prêtent à diverses comparaisons :

— dans un même profil : entre fractions d'un même horizon, entre fractions homologues des divers horizons, entre ces horizons eux-mêmes ;

— entre profils.

A. — *Interprétation des courbes dans le cas d'un profil donné*

Cette interprétation peut être illustrée par un exemple (profil 13, fig. 5). Il s'agit d'une rendzine formée sur calcaire bathonien. L'horizon A et le niveau d'altération (C_1) du matériau originel ont des compositions granulométriques voisines et les teneurs en carbonates semblent indiquer un appauvrissement en surface.

a) *Teneurs en carbonates dans les fractions.*

Ces teneurs, faibles dans les fractions inférieures à 20 μ, augmentent sensiblement (20-50 μ) pour se stabiliser vers 80 p. 100 dans les fractions supérieures à 50 μ.

Le parallélisme relatif des courbes reflète une analogie de composition des deux horizons et le décalage vertical traduit les différences de teneurs entre fractions homologues.

Ce décalage ne permet toutefois d'expliciter l'écart des teneurs globales en carbonates des deux horizons que si l'on fait intervenir l'effectif de chaque fraction granulométrique.

La somme des teneurs partielles exprime alors la teneur globale en carbonates :

Horizons	0 - 2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200 μ-2mm	Total
A	1,1	0,9	10,2	12,0	6,0	30,2
C_1.....	1,3	1,4	13,3	14,4	9,9	40,3

Les fractions fines interviennent pour très peu dans le total et c'est au niveau des fractions sableuses qu'interviennent des écarts susceptibles d'expliquer l'appauvrissement en surface.

Deux facteurs jouent simultanément et dans le même sens : variation d'effectifs des fractions sableuses homologues et variation de teneur en carbonates.

La prédominance des carbonates calciques dans la fraction grossière a pour corollaire une plus grande solubilité et, par suite, une altération préférentielle.

b) *Teneurs en cations Ca^{++} et Mg^{++}*

Le parallélisme des courbes de teneurs en Ca^{++} dans les deux horizons est net. Il en est de même pour les courbes de teneur en Mg^{++}. Toutefois, tandis que les courbes (Ca) sont constamment ascendantes, les courbes (Mg) divergent à partir de 20-50 μ et les teneurs baissent très sensiblement dans la fraction 200 μ-2 mm.

On met ainsi en évidence des *changements de composition entre fractions* au regard des constituants carbonatés, changements liés à la composition intime du matériau originel.

c) *Considérations d'ensemble.*

Sans analyser en détail les autres profils étudiés, on peut dégager quelques remarques :

1. Dans un profil donné, on relève en général, d'une fraction granulométrique

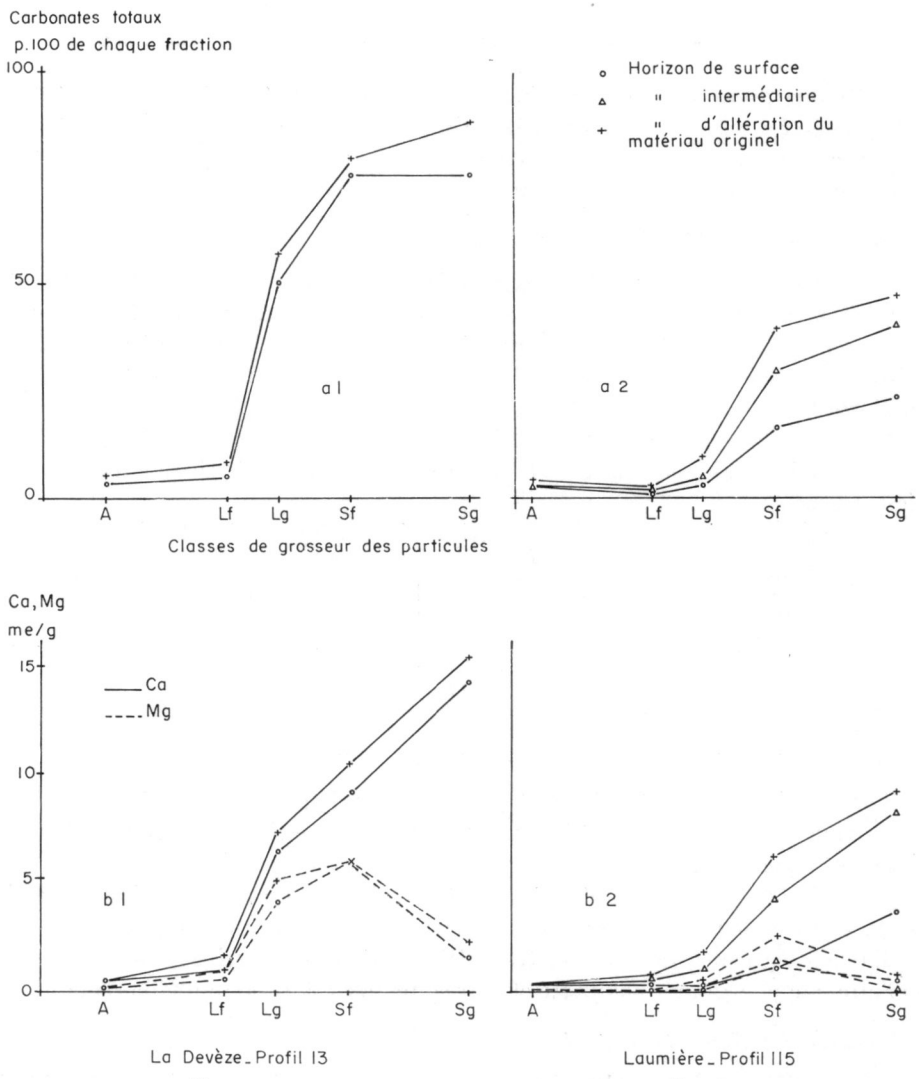
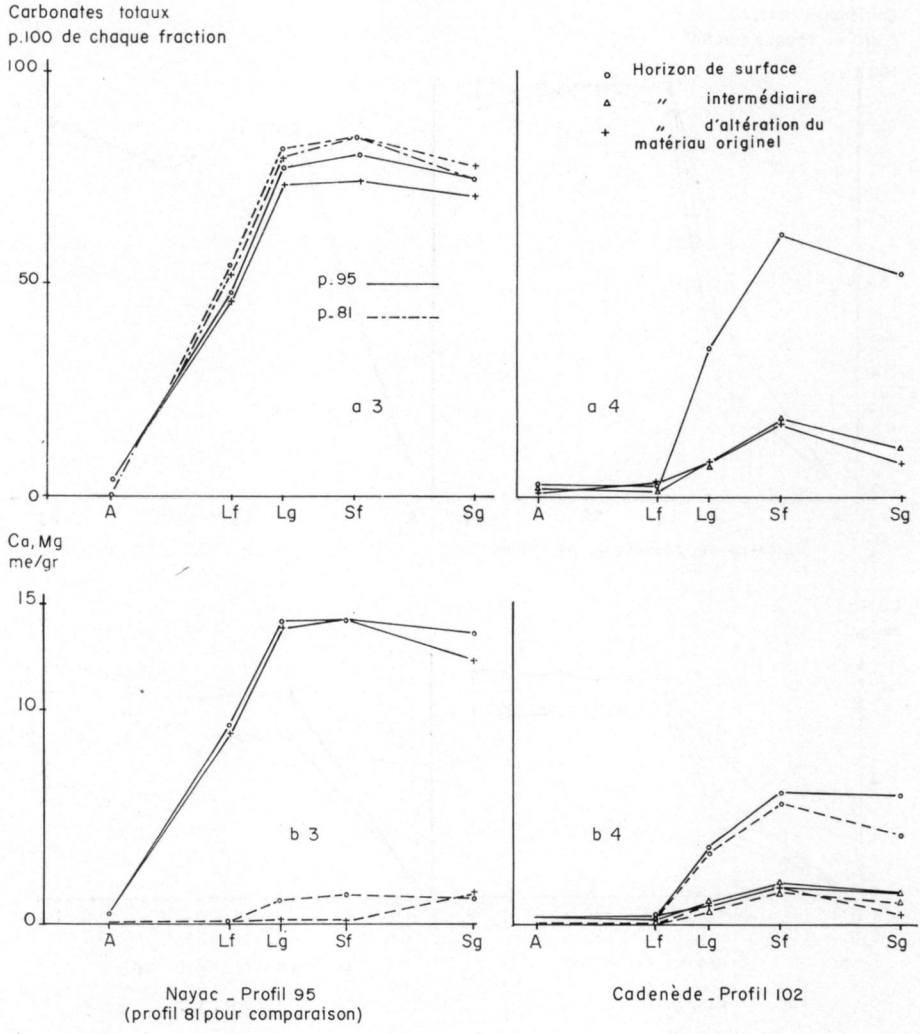


FIG. 5. FIG. 6.

FIG. 5 à 11. — *Courbes de répartition granulométrique des carbonates totaux et des cations Ca^{++} et Mg^{++}*
A : 0-2 µ L_f : 2-20 µ L_g : 20-50 µ S_f : 50-200 µ S_g : 200 µ-2 mm
a : Carbonates totaux exprimés en CO_3Ca p. 100 de chaque fraction
b : Ca^{++} et Mg^{++} exprimés en me/g de chaque fraction

à l'autre, des variations parfois importantes de teneurs en carbonates, ainsi qu'en calcium et magnésium ; la forme des courbes précise le sens de ces variations.

2. Pour un profil et un constituant donnés, les courbes représentatives des divers horizons peuvent : ou bien être pratiquement confondues en tout ou partie, ou bien présenter un certain parallélisme — à tout le moins des changements de pentes homologues — ou bien être franchement divergentes.



Nayac _ Profil 95
(profil 81 pour comparaison)

FIG. 7.

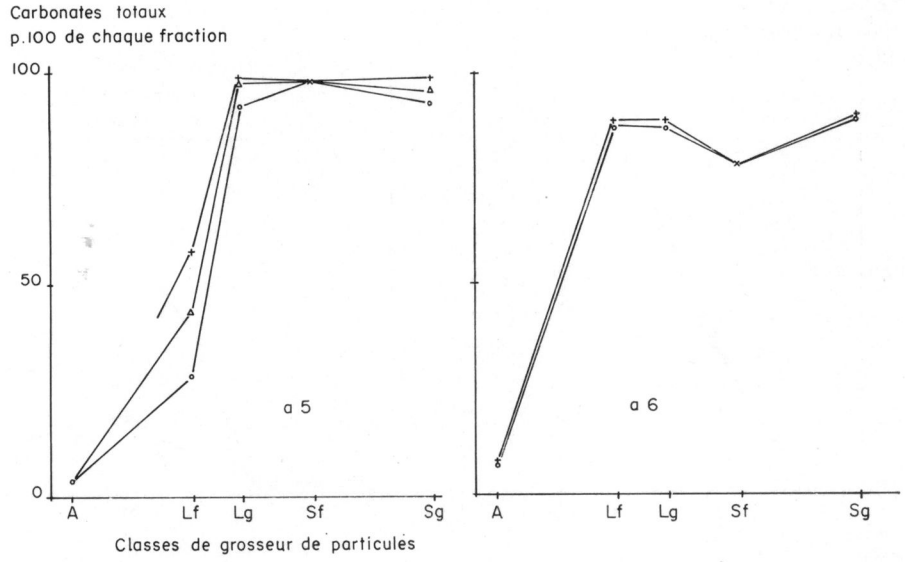
Cadenède _ Profil 102

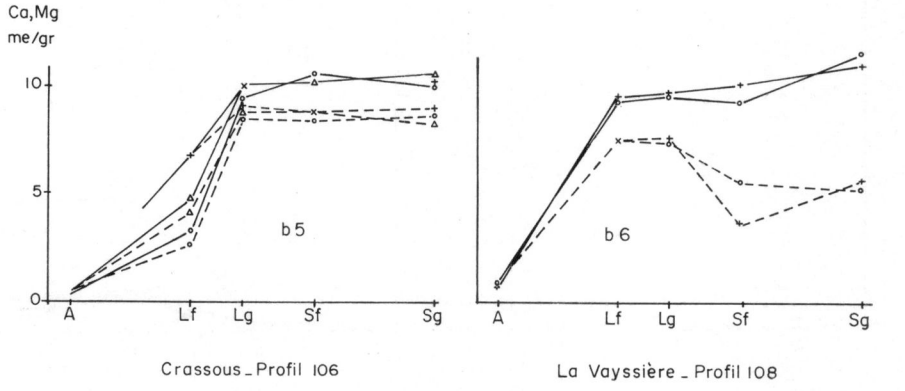
FIG. 8.

Des courbes confondues ou très rapprochées (profil 2, fig. 11 ou 95, fig. 7, par exemple) indiquent simplement que, dans les divers horizons, les fractions homologues ont des teneurs très voisines soit en carbonates, soit en calcium, soit en magnésium. Elles ne permettraient de conclure à une similitude de composition des horizons que si, par ailleurs, les effectifs des fractions sont très voisins d'un horizon à l'autre.

Des courbes sensiblement parallèles, avec un certain décalage vertical indiquent pour le constituant considéré des variations de même sens, le décalage des courbes définissant les différences de teneurs entre fractions homologues (profil 115, fig. 6, par exemple).

Enfin, des courbes franchement divergentes indiquent une forte présomption de perturbation accidentelle, ou de remaniement ou de superposition de matériaux





Crassous - Profil 106

FIG. 9.

La Vayssière - Profil 108

FIG. 10.

différents. Le profil 102 (fig. 8) montre l'effet d'un défoncement, avec apport en surface de matériau originel, mais le raisonnement vaudrait également pour des sols polygènes.

3. Dans un profil donné, il est souvent intéressant de comparer entre elles les courbes relatives aux carbonates totaux, au calcium et au magnésium d'un horizon donné.

Ainsi, on note assez fréquemment des changements de pente homologues entre les courbes de carbonates et les courbes de Ca^{++}, alors que Mg^{++} évolue d'une façon indépendante.

Mais surtout les variations de position relative des courbes (Ca) et (Mg) reflètent des variations du rapport Ca/Mg c'est-à-dire *grosso modo* les variations des proportions relatives de calcaire et de dolomie dans les diverses fractions. En d'autres

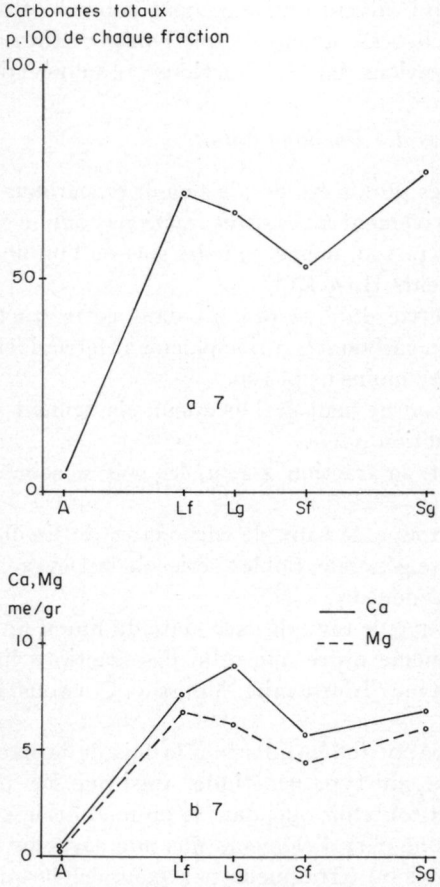


FIG. 11.

termes, les courbes (Ca) et (Mg) permettent d'apprécier des analogies (profil 106, fig. 9) ou des différences (profil 108, fig. 10) de composition chimique des carbonates entre fractions granulométriques d'un même horizon.

Il resterait à déterminer si les variations de composition entre fractions sont liées à des phénomènes d'apport ou à l'hétérogénéité propre du matériau originel (ce que l'on pourrait vérifier par l'examen morphoscopique des sables et par l'étude en lame mince ou en section polie du matériau altéré).

B. — *Comparaison entre profils. Signification pédologique de quelques observations*

Les courbes représentatives des teneurs en carbonates (et en Ca^{++} et Mg^{++}) ont, dans chaque profil, une allure spécifique, qui confirme dans une large mesure les distinctions entre séries établies par le pédologue de terrain.

Les observations qui suivent ont seulement pour objet d'illustrer, par des comparaisons entre profils, les enseignements que l'on peut tirer d'un simple dosage des carbonates et de leurs cations dans les fractions granulométriques.

a) *Teneurs en carbonates des fractions fines.*

Dans l'ensemble des profils étudiés, la teneur en carbonates de la fraction 0-2 μ est très faible comparativement aux autres fractions comme en valeur absolue, et ne dépasse en aucun cas 5 p. 100, même dans les sols où l'on ne constate aucune perte imputable aux traitements H_2O_2-KCl.

Il faut donc admettre qu'il se produit dans cette fraction une concentration d'éléments résiduels non carbonatés, principalement ferrugineux, siliceux ou silicatés, dans une proportion d'au moins 95 p. 100.

Quoi qu il en soit, on ne peut établir aucun classement sur la base de la teneur en carbonates de la fraction 0-2 μ.

En ce qui concerne la fraction 2-20 μ, les sols se scindent nettement en deux groupes.

Dans le premier groupe, le taux de carbonates du limon est voisin de celui de l'argile et, d'une manière générale, faible : séries de la Devèze, Caoumillas, Laumière, Malevieille, Le-Casse, Cadenède.

Dans le second groupe, le taux de carbonate du limon fin est supérieur à celui de l'argile et parfois du même ordre que celui des fractions limoneuses grossières et sableuses : séries de Nayac, Tournemire, Moussac, Crassous, La Vayssière, La Borie-Blanque.

Cette répartition paraît indépendante à la fois de la nature du matériau, de la position stratigraphique, du type génétique, ainsi que des proportions relatives de Ca^{++} et Mg^{++}. Il se peut toutefois que, dans le premier groupe, la fraction 2-20 μ provienne au moins pour une part d'éléments fins non carbonatés du matériau originel (ciments siliceux, silicatés ou ferrugineux par exemple), ce qui justifierait une caractérisation pétrographique très poussée de ce matériau.

Les séries de Combalou (profil 118) et Lauras (profil 83) volontairement omises, sont pratiquement dépourvues de carbonates dans toutes les fractions. Il s'agit vraisemblablement de pararendzines.

Un rapprochement s'impose entre la teneur en carbonates de la fraction 2-20 μ rapportée à l'effectif de cette fraction et le taux de calcaire actif (Drouineau, 1942) : en fait, une corrélation semble exister entre ces deux valeurs, en sols calcaires ou faiblement magnésiens. Ce n'est plus le cas en sols dolomitiques. Pratiquement, le calcaire actif paraît correspondre au $CaCO_3$ (non combiné dans la dolomie) des fractions inférieures à 20 μ, y compris les carbonates perdus lors des traitements H_2O_2-KCl. Le dosage de Ca^{++} et Mg^{++} présente donc, à ce point de vue, un certain intérêt.

b) *Cas d'analogie de répartition des carbonates en fonction de la granulométrie.*

De telles analogies ont été observées d'une part sur des sols de la série de Nayac (profils 81 et 95, fig. 7), d'autre part sur divers sols dérivant de formations hettangiennes variées.

Dans le cas de Nayac, la formation marno-calcaire pliensbachienne présente des caractères pétrographiques assez constants dans l'ensemble du périmètre de Roquefort.

La similitude des courbes de teneurs en carbonates des fractions ne constitue pas à elle seule un critère d'homogénéité de la série pédologique mais elle recoupe assez bien les observations de terrain et les données analytiques de SERVAT et NAERT (1966).

Dans le cas des sols sur formations hettangiennes, l'analogie est moins prononcée, car les valeurs numériques trouvées varient notablement d'un profil à l'autre. Ces sols, provenant de deux régions géographiques distinctes (Meyssac et Roquefort) se sont formés sur des matériaux appartenant à divers niveaux stratigraphiques du même étage.

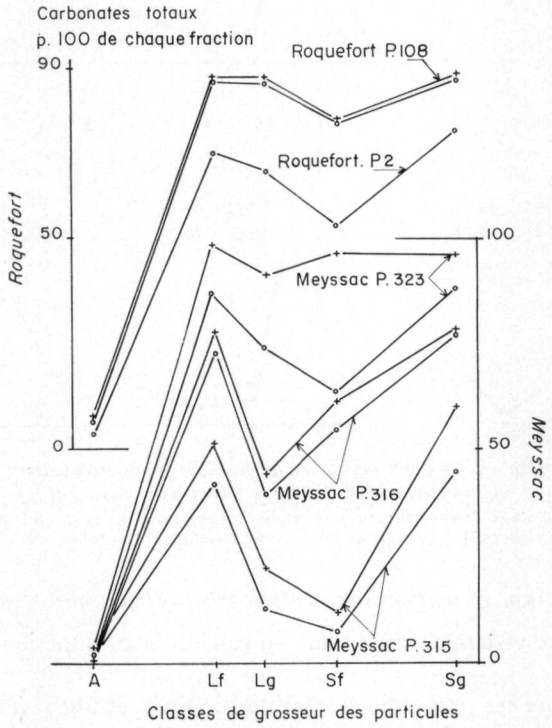


FIG. 12. — *Teneurs en carbonates totaux des fractions granulométriques dans divers sols sur matériaux héttangiens*
(A : 0-2 μ ; L_f: 2-20 μ ; L_g : 20-50 ; S_f : 50-200 μ ; S_g : 200 μ-2 mm)

Néanmoins, il se dégage de la comparaison des courbes (fig. 12) une même allure d'ensemble :

— teneurs en carbonates généralement basses dans la fraction 0-2 μ ;

— existence d'un « pic » dans la fraction 2-20 μ, suivi d'un creux dans les fractions 20-50 μ et 50-200 μ ;

— teneurs élevées dans la fraction 200 μ-2 mm (du même ordre que pour 2-20 μ).

Si l'on exprime les carbonates non plus en pourcentage de chaque fraction, mais en pourcentage des carbonates totaux, on obtient des diagrammes très semblables (fig. 13), avec non seulement une distribution homologue, mais aussi des valeurs du même ordre, bien que les teneurs globales en carbonates des divers échantillons considérés passent de 15,7 à 86,7 p. 100.

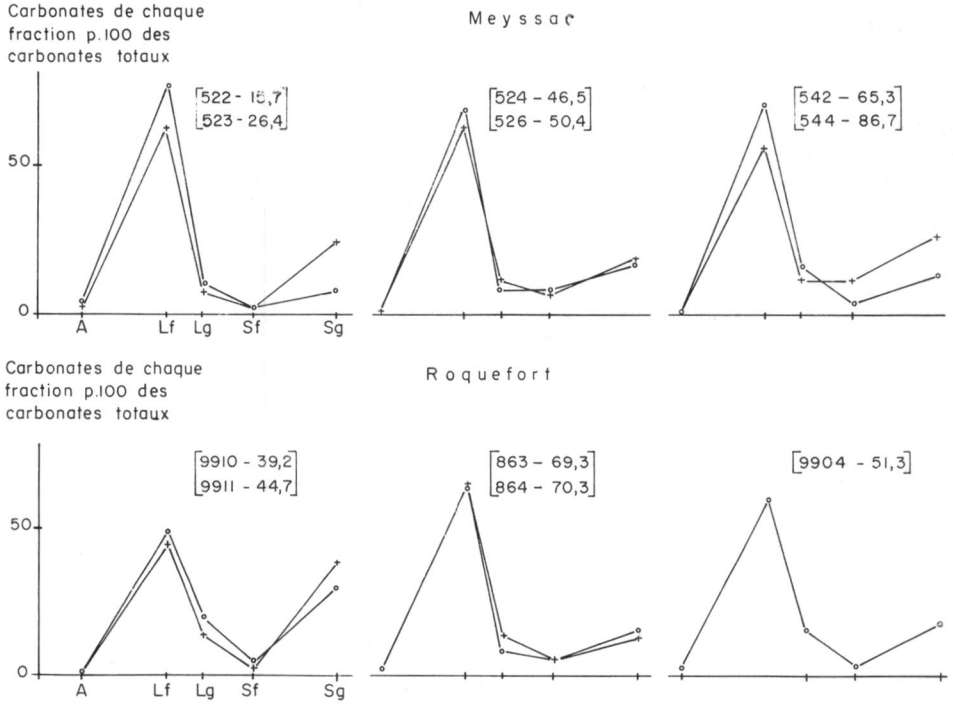


Fig. 13. — *Carbonates dans les fractions granulométriques en pourcentage des carbonates totaux de la terre fine* (< 2 mm) *dans divers sols sur formations hettangiennes* (Meyssac et Roquefort)
Les nombres entre crochets [ ] indiquent les teneurs en carbonates totaux des horizons considérés

c) *Teneurs en calcium et magnésium. Intérêt du rapport équivalentaire* Ca^{++}/Mg^{++}.

D'une manière générale, les teneurs en calcium sont supérieures aux teneurs en magnésium.

Si l'on compare les proportions relatives de Ca^{++} et Mg^{++} (exprimées en milliéquivalents par gramme de terre fine ou de fraction granulométrique), trois cas peuvent se présenter :

1. Mg^{++} est présent en quantités faibles, parfois négligeables par rapport à Ca^{++}. Le rapport Ca^{++}/Mg^{++} est supérieur à 10 et atteint 40 à 50 : séries de Caoumillas, Tournemire, Nayac, Malevieille. Ces sols sont à prédominance calcaire.

2. Mg^{++} est présent en quantités plus faible que Ca^{++} mais néanmoins relati-

vement importantes. Le rapport Ca^{++}/Mg^{++} est inférieur à 10 et généralement compris entre 2 et 8 : séries de la Devèze, Laumière, Le Casse. Ces sols sont à prédominance de calcaire magnésien.

3. Mg^{++} est présent en quantités sensiblement équivalentes à Ca^{++} et le rapport Ca^{++}/Mg^{++} est toujours très voisin de 1 à 1,3 : séries de Cadenède, Crassous, La Vayssière, Borie-Blanque. Ces sols sont à prédominance dolomitique.

Il convient de noter que la valeur caractéristique du rapport Ca^{++}/Mg^{++} est le seul point commun entre des sols dolomitiques par ailleurs assez différents du point de vue morphologique et analytique, ainsi que par l'appartenance stratigraphique du matériau originel.

Dans cet ordre d'idées, une publication récente à caractère écologique (BOUKHRIS, 1967) fait état, dans un ensemble de sols sur matériaux dolomitiques différents, de teneurs en Ca total et Mg total dont le rapport est toujours très voisin de 1,70 [1], ce qui correspond précisément à un rapport équivalentaire de 1.

Ces résultats semblent confirmer que le rapport équivalentaire Ca^{++}/Mg^{++} proche de 1 peut constituer un bon critère de caractérisation des cryptorendzines (rendzines dolomitiques) à condition que cette valeur ne se limite pas à une fraction isolée, ou même à un seul horizon du profil — auquel cas on peut tout de même diagnostiquer un phénomène d'apport (profil 115 par exemple).

Il ne serait pas sans intérêt de comparer les valeurs de rapport Ca^{++}/Mg^{++} trouvées dans les horizons du profil avec celle trouvée dans le matériau inaltéré.

Un calcul théorique, basé sur la classification des roches dolomitiques d'après JUNG (1963) donne les résultats suivants :

	Dolomie (%)	Rapport équivalentaire théorique Ca^{++}/Mg^{++}
Dolomie	100-90	1,0- 1,2
Dolomie calcaire	90-50	1,2- 3,0
Calcaire dolomitique	50-10	3,0-19,0
Calcaire magnésien	10- 5	19,0-39,0
Calcaire	5- 0	> 39,0

Les processus d'altération modifient probablement le rapport cationique par dissolution préférentielle du calcaire ; pour les matériaux dolomitiques, cette modification doit être assez faible.

Remarque.

On trouve parfois, dans la fraction 0-2 μ de certains sols sur dolomie, un rapport Ca^{++}/Mg^{++} inférieur à 1 qui pourrait être dû à la présence de Huntite $Mg_3Ca(CO_3)_4$ (FAUST, 1953), signalé comme produit de décomposition de la dolomie(DEER, HOWIE, ZUSSMAN, 1964).

[1] L'auteur exprime les teneurs en pourcentages et non en milli équivalents.

CONCLUSION

Le but primitif de l'étude entreprise, à savoir un essai de caractérisation de certains sols calcimagnésiques par la répartition des carbonates dans les fractions granulométriques, impliquait la recherche d'une méthode de dosage suffisamment fine.

La calcimétrie s'étant révélée inadéquate pour diverses raisons, le choix s'est porté sur l'acidimétrie, moins rigoureuse que les méthodes gravimétriques ou par distillation sous vide, mais rapide et simple et semblant bien s'adapter au but recherché.

Au cours des essais, il est apparu que l'on pouvait, par une adaptation du protocole, compléter le dosage des carbonates totaux par le dosage de Ca^{++} et Mg^{++} sur le même extrait et connaître ainsi, au moins approximativement, les proportions relatives $CaCO_3$ et $MgCO_3$.

Les mesures effectuées ont montré que la sensibilité de la méthode était suffisante, compte tenu des teneurs en carbonates mises en jeu, et que, par ailleurs, les résultats obtenus étaient reproductibles. Mais elles ont mis aussi en évidence deux inconvénients majeurs :

— l'un lié au principe même de la méthode et aboutissant à une surestimation des carbonates *sensu stricto*,

— l'autre paraissant tenir aux traitements qui précèdent la séparation granulométrique et entraînant des pertes de carbonates assez sensibles dans certains sols, pertes qui peuvent être chiffrées globalement, mais ne permettent pas de préciser l'erreur commise dans l'appréciation des carbonates de chaque fraction.

L'analyse statistique des résultats obtenus montre néanmoins que cette méthode a une valeur comparative pour les horizons d'un profil ou pour des sols similaires du point de vue minéralogique.

Elle a, pour le moins, valeur de test et, par un simple dosage global sur la terre fine, permet avec une approximation suffisante un triage et un classement des sols calcimagnésiques en :

— fortement, moyennement et faiblement carbonatés d'une part ;

— calciques, calco-magnésiens et dolomitiques d'autre part.

A ce point de vue, elle permet de diagnostiquer facilement les cryptorendzines (rapport Ca^{++}/Mg^{++} voisin de 1).

Enfin, elle constitue, dans le cas des dosages par fractions, un test d'homogénéité, ou d'hétérogénéité, de composition des fractions granulométriques.

Du point de vue pédologique, l'interprétation des résultats conduit à un échec partiel, dans la mesure où l'on pensait pouvoir établir une distinction au niveau du groupe (entre rendzines et sols bruns calcaires par exemple) sur la base de la teneur en carbonates de la fraction 0-2 μ ou de la répartition des carbonates entre les diverses fractions. En d'autres termes, cette répartition ne se traduit pas d'une manière simple en diagrammes de type « rendzine » ou de type « sol brun calcaire ».

En fait, la discrimination se situerait plutôt au niveau de la famille, la distribution granulométrique des carbonates et des cations semblant liée à l'organisation

interne du matériau originel. Ceci confirme le fait bien connu de l'influence prépondérante du matériau originel dans la genèse des sols calcimagnésiques.

La connaissance de cette distribution se révèle d'ailleurs intéresssante à plus d'un titre.

Les variations de teneurs en carbonates totaux, ou les variations de valeur du rapport Ca^{++}/Mg^{++} entre fractions d'un même échantillon sont en général fonction de la prédominance de telle ou telle espèce minérale dans l'une ou l'autre des fractions considérées. Elles sont souvent en rapport avec la composition pétrographique du matériau originel, fort hétérogène lui-même dans certains cas.

Ces variations de composition minéralogique des fractions permettent d'expliquer par exemple pourquoi certains sols, même fortement carbonatés sont pauvres en calcaire actif : sols dolomitiques ou sols calcaires dont les carbonates se concentrent sous forme cristallisée dans les fractions grossières, alors qu'ils font défaut dans la fraction 2-20 μ.

Dans un ordre d'idée un peu différent, il est possible de déterminer si un appauvrissement apparent en carbonates de l'horizon de surface est dû à la dissolution du calcaire, ou à des variations d'effectif et de composition des fractions granulométriques, autrement dit si le sol a évolué en place ou s'il a subi des remaniements.

Des améliorations sont possibles et, surtout, cette méthode doit être utilisée concurremment avec les critères morphologiques et analytiques classiques, ainsi qu'avec l'étude pétrographique du matériau originel.

A ces conditions, elle pourrait apporter une contribution à la classification des sols calcimagnésiques, ainsi qu'à l'étude de leur genèse, sous réserve bien entendu qu'ils aient évolué sous végétation naturelle et n'aient pas été perturbés par la culture.

Reçu pour publication en novembre 1968.

SUMMARY

DETERMINATION OF THE CARBONATES IN THE GRANULAR FRACTIONS OF VARIOUS CALCAREOUS AND DOLOMITIC SOILS

A method has been developed with a view to study the distribution and nature of the carbonates in various granular fractions of calco-magnesian soils.

This method involves, following a hot hydrochloric attack :

i) the acidimetric determination of the total carbonates ;

ii) the complexometric determination of the carbonate cations Ca^{++} and Mg^{++}, both in fine earth and granular fractions.

The method has been applied to various soils on limy and dolomitic bedrock.

As regards total carbonates, acidimetry and volumetric calcimetry match pretty well (fig. 1). However, the latter tends to underestimate the carbonate content in dolomitic soils owing to an incomplete cold attack.

The accumulated carbonates found in the various fractions nearly always yield higher data than the measured total content of fine earth (fig. 2). The shortage, which is substantial in some soils originated from marls or soft limestone, is ascribable to the solubilization losses that occurred during the treatment preceding the granular separation. The same remark applies to the Ca^{++} and Mg^{++} cations (fig. 3). Comparing the acidimetrically-measured CO_3^{--} with the CO_3^{--}, as measured on the basis of the determined cations, shows that they match fairly well.

Applied to the pedologic profile, the method enables to plot the distribution of the carbonates, and of the Ca^{++} and Mg^{++} in the granular fractions of the various horizons.

In this way the different distributions and compositions of carbonates may be evidenced, thus providing additional information on the pedogenesis and evolution conditions.

Likewise, comparing the profiles (fig. 5 to 18) brings out the value of such criteria as the Ca^{++}/Mg^{++} ratio or the carbonate content of the fractions wherein the grain size is less than 20 μ. Thus :

i) when the Ca^{++}/Mg^{++} is close to unity, this permits of singling out the dolomitic rendzines with respect to calcic or calco-magnesian soils ;

ii) the calcium-carbonate content of the fractions wherein the grain size is less than 20 μ (or, in dolomitic soils, the portion of uncombined $CaCO_3$ in the dolomite) matches well with the proportion of active limestone.

It may occur that such comparisons show similar carbonate distributions and compositions of the mapped areas, thus enabling to define them far more accurately.

ZUSAMMENFASSUNG

DOSIERUNG DER KARBONATE IN DEN GRANULOMETRISCHEN BRUCHSTÜCKEN EINIGER KALKHALTIGER UND DOLOMITISCHER BÖDEN

Um die Verteilung und die Natur der Karbonate in den verschiedenen granulometrischen Bruchstücken der kalk-und magnesiumhaltigen Böden zu untersuchen, wurde eine Methode entwickelt.

Nach der Chlorwasserstoffeinwirkung bei Hitze, besteht diese Methode :

— in der Dosierung der gesamten Karbonate mittels Säuremessung,

— in der Dosierung der Kationen Ca^{++} und Mg^{++} der Karbonate mittels Komplexmessung zugleich auf feinem Boden und auf den granulometrischen Teilstücken.

Diese Verfahren wurden auf kalkigen und dolomitischen Marteialien aus verschiedenen Böden angewandt.

Was die gesamten Karbonate anbetrifft, ist die Uebereinstimmung zwischen der Säuremessung und der mengenmässigen Kakmessung ziemlich befriedigend (Abb. I). Diese letztere führt jedoch, infolge eines unvollständigen Zerfalles bei Kälte, zu einer Unterschätzung der Karbonate in den dolomitischen Böden.

Die Anhäufung der in den verschiedenen Bruchstücken gefundenen Karbonate führt fast immer zu höheren Resultaten als die Messung des gesamten Gehaltes des feinen Bodens (Abb. 2) — Der Fehlbetrag — in bestimmten aus Mergel und weichen Kalkerden stammenden Böden bedeutend — ist den Verlusten zuzuschreiben, die bei der Lösbarmachung während der Behandlungen auftreten, welche der granulometrischen Trennung vorangehen. Dieselbe Beobachtung bezieht sich auch auf die Kationen Ca^{++} und Mg^{++} (Abb. 3). Der Vergleich von CO_3^{--} — festgestellt durch Säuremessung — und von CO_3^{-} geschätzt auf Grund der dosierten Kationen (Abb. 4) — ergibt eine ziemlich gute Uebereinstimmung.

Auf das pedologische Profil angewandt, erlaubt die Methode, Verteilungsdiagramme der Karbonate sowohl von Ca^{++} und Mg^{++} in den granulometrischen Bruchteilen der verschiedenen Horizonte herzustellen.

So ist es möglich, Verteilungs-und Zusammensetzungsvariationen der Karbonate zu bestimmen, die eine zusätzliche Auskunft über die Bedingungen der Bodenbildung und der Evolution geben.

Ebenso muss der Vergleich der Profile (Abb. 5 bis 18) die Bedeutung solcher Kriterien hervorheben wie das Verhältnis Ca^{++}/Mg^{++} oder den Karbonatgehalt von Bruchteilen unter 20 μ. So :

— erlaubt das Verhätnis Ca^{++}/Mg^{++}, wenn es an 1 grenzt, die dolomitischen Rendzina von den kalkigen oder kalk-magnesiahaltigen Böden abzusondern.

— entspricht ungefähr der Kalciumskarbonatgehalt bei Bruchteilen von weniger als 20 μ (oder in dolomitischen Böden der im Dolomit nicht kombinierte $CaCO_3$ Anteil) der aktiven Kalkrate.

In verschiedenen Fällen zeigen diese Vergleiche Aehnleichkeit von Verteilung und Zusammensetzung der Karbonate, die einen Test von Homogeneität kartographischer Einheiten darstellen und ihre bessere Bestimmung erlauben.

РЕЗЮМЕ

Дозировка карбонатов гранулометрических фракций некоторых известковых почв и доломитов.

М. ДЮПЮИ.

Автор разработал метод изучения, распределения и природы карбонатов в различных гранулометрических фракциях кальциево-магниевых почв.

Этот метод заключается в обработке соляной кислотой при нагревании и последующих за этой обработкой операций :

— дозировка общих карбонатов с помещью асидиметрии.

— дозировка катионов Ca^{++} и Mg^{++} карбонатов комплексометрическим способом, одновременно в мелкоземе и в гранулометрических фракциях.

Эти технические приемы были применены при анализе разных известковых и доломитовых почв.

Что касается валовых карбонатов, то отмечено хорошее соотношение между асидиметрией и об'емной кальциметрией (Рис. 1). Однако, эта последняя приводит скорее к недооценке карбонатов в доломитовых почвах, из-за неполной обработки без нагревания.

Общая сложность карбонатов найденных в различных фракциях, дает почти всегда результаты превосходящие цифры полученные после измерения общего содержания мелкозема (Рис. 2). Крупный дефицит некоторых производных мергелевых, или мягких известковых почв, может быть отнесен за счет потерь вызванных растворением во время обработки предшествовавшей гранулометрическому разделению. Теже замечания могут быть сделаны по отношению катионов Ca^{++} и Mg^{++} (Рис. 3). Сравнение содержания CO_3^{--}, полученного при помощи асидиметрии и CO_3^{--} рассчитанного на базе дозировавшихся катионов (Рис. 4), дает довольно сходные результаты.

В применении к педологическому профилю, метод позволяет вывести диаграммы распределения карбонатов, также как и Ca^{++} и Mg^{++} между разными гранулометрическими фракциями различных горизонтов.

Таким образом, представляется возможность выявить различия в распределении и в составе карбонатов, и получить добавочную информацию об условиях почвообразования и эволлюции почв.

Сравнение профилей (Рис. 5-18) выявляет также интерес таких критериев как соотношение Ca^{++}/Mg^{++}, или содержание карбонатов во фракциях меньше 20 μ. Так например :

— в случаях когда соотношение Ca^{++}/Mg^{++} приближается к 1, оно позволят обособить доломитические рендзины по отношению к почвам известковым или известково-магниевым.

— доля фракций размеров меньше 20 μ (или, в почвах доломитовых — доля несвязанного $CaCO_3$), почти-что соответствует пропорции активного кальция.

Сравнения эти указывают, в некоторых случаях, на аналогии распределения и состава карбонатов, представляющих тест однородности картографированных единиц и позволяют уточнить их определение.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLISON L. E., MOODIE C. D., 1965. Carbonate, in : *Methods of soil analysis,* Part. 2. Agronomy 9, 1387-88. 2 vol. *Amer. Soc. Agric.* Madison.

ANDERSON J. U., 1963. An improved treatment for mineralogical analysis of samples containing organic matter, 380-388. *Proc. 10th nation. Conf. Clay and Clay minerals* (Austin).

BONFILS P., 1966. *Étude pédologique du Bassin de Brive.* Rapport nº 42 S. E. S. 2 tomes, 151 p. + 2 cartes Montpellier.

BOUKHRIS M., 1967. *Sur l'écologie et la nutrition des végétaux croissant sur dolomies dans le sud de la France,* 12-13. Document nº 40. C. N. R. S. Centre d'Études phytosciologiques et écologiques. Montpellier.

BOURGET S. J., TANNER C. B., 1953. Removal of organic matter with sodium hypobromite for particle size analysis of soils. *Canad. J. Agric. Sci.,* **33**, 579-585.

BREWER R., 1954. *Fabric and mineral analysis of soils.* 418-419, 1 vol. 470 p., John Wiley and Sons. Ed. New York.

DEER W. A., HOWIE R. A., ZUSSMANN J., 1964. *Rock forming minerals,* vol. 5 : Non silicates, 302-304. 5 volumes, Longmans, London.

DROUINEAU G., 1942. Dosage rapide du calcaire actif des sols. Nouvelles données sur la répartition et la nature des fractions calcaires. *Ann. agron.,* **12**, p. 441-450.

FAUST G. T., 1953. Huntite $Mg_3Ca\,(CO_3)_4$, a new mineral. *Amer. Mineralogist,* **38**, 4-24.

GACHON L., 1963. Contribution à l'étude du Quaternaire récent de la Grande Limagne marno-calcaire. *Ann. agron.,* **14**, hors-série 1 ; 27 et 46-50.

JACKSON M. L., 1958. *Soil chemical analysis,* 1 vol., 77-68. Prentice-Hall. Englewood Cliffs N. J.

JUNG J., 1963. *Précis de Pétrographie,* 113, 1 vol., 319 p. 2e éd. Masson, Paris.

SERVAT E., NAERT B., 1966. *Étude pédologique du Causse de Roquefort.* Rapport nº 51 S. E. S. 1 vol., 155 + 31 p., 2 cartes. Montpellier.

SHIELDS L. G., MEYER M. W., 1964. Carbonate clay. Measurement and relationship to clay distribution and cation exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,* **28**, 2, 416-419.

U. S. SALINITY. LABORATORY STAFF, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Method 23 c. *U. S. Dept. Agric. Handbook.* **60**.

Ann. agron., 1969, **20** (1), 89-104.

L'UTILISATION DU POTASSIUM 40 ET POTASSIUM 42 EN AGRONOMIE

M. BOUAT

Services agronomiques,
Société commerciale des Potasses d'Alsace, 68- Mulhouse

SOMMAIRE

Dans ce travail bibliographique, l'auteur rappelle les principales études réalisées jusqu'en 1967 dans la branche agronomie grâce à l'utilisation de ^{40}K et ^{42}K. Il suggère en conclusion quelques expériences susceptibles d'apporter d'utiles renseignements aux agronomes étudiant les problèmes de fertilisation.

INTRODUCTION

En agronomie comme en d'autres domaines de la recherche, les radioéléments peuvent être utilisés à plusieurs fins. Les effets des rayonnements nucléaires sont susceptibles d'applications pratiques, telles que mutagenèse, conservations d'aliments, stérilisation d'insectes, mesures d'humidité par la sonde à neutrons.

D'autre part, les isotopes, radioactifs ou non, sont utilisables comme traceurs, notamment comme indicateurs d'origine, permettant de suivre l'évolution d'un élément introduit dans un milieu qui contient déjà cet élément sous une autre forme isotopique. Les isotopes radioactifs sont d'un emploi particulièrement commode, en raison de la facilité de leur détection.

L'amélioration des plantes, l'entomologie, la zootechnie, notamment, ont bénéficié largement de l'emploi de ces techniques. Nous allons résumer dans ce rapport les résultats qu'a permis d'obtenir en agronomie l'utilisation de potassium radioactif.

I. — LES ISOTOPES DU POTASSIUM

Métal alcalin monovalent de masse atomique 39, 100, le potassium se trouve dans la nature sous forme d'un mélange de trois isotopes ^{39}K, ^{40}K, ^{41}K. Les deux principaux : ^{39}K (93,1 p. 100) et ^{41}K (6,9 p. 100) sont stables, le troisième, ^{40}K (0,012 p. 100) est radioactif.

D'autres isotopes radioactifs peuvent être obtenus dans les piles atomiques. Ce sont ^{37}K (période : 1,2 seconde), ^{38}K (7,7 minutes), ^{42}K (12,4 heures), ^{43}K (22 heures), ^{44}K (22 minutes), ^{45}K (34 minutes). Ceux-ci émettent principalement des rayonnements β.

Les faibles quantités produites, les difficultés de séparation, les périodes trop brèves, conduisent à n'utiliser pratiquement que ^{40}K et ^{42}K en agronomie.

— ^{40}K a une période très longue ($1,3 \times 10^9$ années), ce qui oblige à en apporter des quantités importantes, et rend son emploi délicat dans nombre d'études. Son prix est, en outre, fort élevé (enrichi de 30 à 55 p. 100 en ^{40}K, le mg de potassium coûte environ : 200 $). Il donne 11 p. 100 de rayonnements γ et 89 p. 100 de β, se transmutant finalement en ^{40}Ca.

— ^{42}K a une vie brève (période : 12,4 heures), ce qui limite son utilisation à des expériences de courte durée (de l'ordre d'une semaine). Il émet 18 p. 100 de rayonnements γ et 82 p. 100 de β.

En somme, le potassium n'a pas de radio-isotope d'emploi commode, et c'est sans doute la raison pour laquelle il a été relativement peu utilisé. Une période très longue comme une période trop courte obligent à mettre en œuvre une masse importante d'entraîneur, susceptible de modifier la dynamique de l'élément en question dans le système étudié.

Le potassium se rapproche chimiquement des alcalins de poids atomique élevé, rubidium (85,5) et cesium (133). Les isotopes radioactifs de ces éléments étant d'un emploi plus facile que ceux du potassium, on a songé à les utiliser pour étudier la dynamique de ce dernier (5, 6, 9, 10, 16, 28, 111). Le rubidium est le seul qui puisse être retenu.

II. — GÉNÉRALITÉS SUR LE POTASSIUM

Dans le sol, les ions d'une même espèce peuvent se trouver sous divers états :

— dissous dans l'eau libre du sol ;

— retenus sur ou dans les particules solides, mais actuellement susceptibles de diffuser dans la solution libre ;

— retenus fermement dans la phase solide et actuellement non diffusibles ou très lentement diffusibles.

Définir les fractions des ions K se trouvant sous chacun de ces états, ainsi que les possibilités et vitesses de passage de l'un à l'autre, est un des problèmes qui dominent la dynamique du potassium dans le sol.

Dans le végétal, le potassium représente de 20 à 40 p. 100 (K) des cendres. De nombreux aspects de son rôle dans la plante sont encore mal connus. K a une action importante dans l'assimilation chlorophyllienne ainsi que dans la migration des glucides. Comme conséquence de ce dernier rôle, le potassium influence la répartition des produits de la photosynthèse entre divers organes de la plante, et en conséquence la croissance relative de ces derniers (rapport racines/feuilles, indice de tallage). Le potassium intervient également dans le métabolisme de l'azote et la synthèse des

protides. Il joue un rôle dans la régulation de la transpiration de la plante et, de ce fait, dans le bilan en eau du végétal. La résistance au froid et à des maladies cryptogamiques de certains végétaux a pu être reliée à leur nutrition potassique.

III. — UTILISATION DE ^{40}K ET DE ^{42}K

A. — *Méthodologie et utilisations analytiques*

La technique du comptage de ^{42}K en présence d'autres radioéléments, notamment par usage de filtres, a été précisée (14). Un appareil à scintillation pour comptage localisé, utilisable pour suivre la migration dans les plantes *in vivo* de ^{42}K ajouté au milieu, a été mis au point (26). Par ailleurs, on a étudié les particularités d'utilisation qu'entraîne pour ^{42}K sa courte période, notamment la possibilité de remplacer ^{40}K par ^{42}K dans l'étude de l'absorption et de la libération de K par des minéraux (96).

La radioactivité de ^{40}K a été utilisée pour doser le potassium naturel des engrais des sols ou des plantes, et également pour suivre par autoradiographie les migrations de K de la graine dans la plante en germination.

Il faut tenir compte de la radioactivité de ^{40}K du potassium naturel dans l'étude d'autres radioactivités des sols ou des plantes (25, 46, 76, 87, 88, 89, 138, 139, 150). (1 mg de K naturel est le siège de 2,01 désintégrations/minute). L'isotope ^{42}K a été utilisé pour étudier la cinétique des échanges dans les résines (7-20), les pertes de K par volatilisation dans les silicates (21) ou le transport des ions K dans l'électrophorèse (67).

B. — *Le potassium et le sol*

L'une des principales possibilités offertes par l'emploi des isotopes est l'étude de la diffusibilité des ions retenus en phase solide (72, 85). L'emploi du radiopotassium a permis de constater que dans le sol humide, des échanges de K contre K ont continuellement lieu entre la solution libre et les sites adsorbants externes ou internes des particules solides. La technique utilisée pour déterminer la masse de K participant à ces échanges est celle dite de « dilution isotopique » : on ajoute au système une quantité connue d'un isotope (en général radio-isotope) de l'élément en question sous la forme ionique étudiée, à l'état soluble. Ces ions se mélangent par diffusion avec ceux de même espèce préexistant dans le système à l'état diffusible. A l'équilibre, la proportion des deux isotopes est très sensiblement la même dans les divers compartiments accessibles à la diffusion, les deux isotopes ayant des propriétés pratiquement identiques (si ce n'est pour des atomes légers dont les isotopes ont des masses très différentes). On détermine alors cette proportion dans la solution séparable et, comme on connaît la quantité totale de l'un des constituants (l'isotope ajouté) on en déduit la quantité totale de l'autre.

Le principal avantage de cette technique réside dans le fait que l'on peut doser les éléments retenus à l'état diffusible sur ou dans les particules solides sans les en séparer, donc sans risquer de modifier les liaisons des ions présents. Ceci est particu-

lièrement important dans le cas du potassium dont l'extraction, par du Ca notamment, peut rendre échangeable du potassium qui ne l'était pas antérieurement, ou au contraire rendre non échangeable du potassium qui l'était, par emploi d'un échangeur tel que NH_4 susceptible de fermer des argiles.

Toutefois, comme déjà signalé ci-dessus, pour ne pas perturber la dynamique d'un élément, il faut que l'addition de l'isotope n'augmente pas trop la masse de l'élément en question. Ceci suppose que l'on dispose d'un radio-isotope sans entraîneur ou de forte radioactivité spécifique suffisamment durable.

A vrai dire, la technique de dilution isotopique, envisagée comme moyen d'étude de la diffusibilité d'ions adsorbés, soulève une critique : il arrive que des ions retenus dans certains cristaux puissent s'échanger contre des ions de même espèce de la solution extérieure, mais non contre des ions d'espèce différente. C'est peut-être le cas d'une fraction du potassium de certaines argiles fermées, notamment d'une illite fermée (136). Le potassium déterminé comme autodiffusible (échangeable contre du potassium externe) ne saurait alors être considéré comme diffusible, puisque l'ensemble des ions K retenus dans l'argile n'est, dans ce cas, pas expansible (le remplacement d'un K par un K ne modifie pas la distribution du potassium dans l'espace). Cependant, l'autodiffusion du potassium de ce type d'argile est extrêmement lente (quelques A en 16 mois) et ne saurait porter sur une masse importante qu'au bout d'un temps très long.

Le potassium mobile, ou échangeable en un temps limité (isotopiquement diluable), ne représente en général que quelques unités p. 100 du potassium total du sol (7, 32, 73, 76, 79).

Le radiopotassium a été également utilisé pour préciser les lois de l'échange de K contre d'autres cations dans différentes argiles (75, 124, 135, 136).

Cinétique des échanges isotopiques de K

Le potassium 42 a une vie trop courte pour permettre d'approcher la limite de l'échange isotopique. Cette limite ne serait sans doute atteinte qu'après plusieurs mois au moins, d'après la cinétique de l'échange de K contre d'autres cations. Il est vraisemblable qu'un état stationnaire s'établirait bien avant que K total du sol soit isotopiquement échangé, mais il est vraisemblable également que l'échange isotopique concernerait alors une quantité de K dépassant en général largement K rapidement échangeable.

Seul l'emploi du potassium 40 permettrait d'étudier la lente extension de l'échange isotopique dans les particules de terre, ce qui éclairerait l'agronome sur l'aptitude du sol à reformer le stock de K rapidement assimilable, ou au contraire à faire passer K des engrais solubles sous forme lentement échangeable. D'après nos calculs, il faudrait utiliser dans ce but environ 0,3 mg à 0,5 mg de K enrichi à 80 p. 100 en ^{40}K par 5 g de terre ; cette addition de K ne paraît pas suffisante pour perturber sensiblement la dynamique de l'échange. Le potassium enrichi à 55 p. 100 en ^{40}K, moins coûteux, serait également utilisable. L'importance relative de K rapidement échangeable et de K lentement échangeable, dépend de la nature des minéraux du sol, peut-être de la structure plus ou moins poreuse des agrégats primaires, éventuellement de la présence d'enduits susceptibles de fermer des pores, temporairement ou non.

Les alternances de dessiccation et d'humectation augmentent fortement K isotopiquement échangé en un temps limité, de même qu'elles augmentent fortement K échangé contre d'autres cations, aussi bien lors de la fixation que de la libération. L'extension des échanges en phase solide par alternances de dessiccation et d'humectation ne peut guère s'expliquer que par l'ouverture temporaire de portes de communication entre l'extérieur et l'intérieur.

C. — *Le potassium et la plante*

a) *Absorption par les racines.*

Si une plante préalablement alimentée par une solution contenant du potassium radioactif est transportée sur un milieu à potassium normal, on constate que des racines peuvent excréter du potassium radioactif bien qu'elles continuent à s'alimenter en potassium. Une fraction de K de la plante cependant n'est pas échangeable contre K du milieu. Ce potassium est dit absorbé activement. L'emploi des radioisotopes a été décisif dans l'établissement de ce concept d'absorption active (2, 3, 56, 106).

L'absorption de K par les végétaux varie avec les espèces, elle est plus intense pour les monocotylédones que les dicotylédones. ^{42}K a été utilisé pour étudier l'absorption de K chez l'orge, le maïs, le soja, la betterave, la moutarde, la luzerne, le tournesol, la tomate, les agrumes, les plantes fourragères ou forestières (22, 35, 36, 69, 86, 95, 120, 129, 134, 145, 147, 148, 149).

L'utilisation de radioéléments, notamment ^{86}Rb et ^{42}K, a largement contribué à consolider l'hypothèse des transporteurs sélectifs, auxquels s'attacheraient temporairement du potassium, ou des ions voisins spécifiquement compétitifs de K, et qui permettraient ainsi leur transport à travers des membranes cellulaires.

^{42}K a permis de comparer commodément l'absorption par la plante du potassium de divers sols ou de divers engrais ; il a été ainsi constaté qu'elle absorbe plus de K du bicarbonate ou du chlorure que du sulfate ou du nitrate (100, 104, 131).

On a aussi utilisé ^{42}K pour étudier la compétition entre K et d'autres cations comme NH_4 (68, 99, 100, 120, 152), Ca (31, 56, 71, 81, 100, 102, 115, 116, 148, 153, 156), Mg (100), Na (100, 105, 118, 119, 122, 133, 145, 154, 156). On a constaté que NH_4 et Ca inhibent davantage que Mg et Na l'absorption de K par les plantes.

Enfin, ^{42}K a été utilisé pour essayer de résoudre un problème important pour l'agronome : savoir si le contact des racines avec les échangeurs d'ions du sol favorise l'absorption par les plantes des ions retenus par ces échangeurs ; des observations sur plantules de seigle cultivées en milieu additionné ou non de kaolinite, illite, ou montmorillonite sont en faveur d'une réponse affirmative à cette question (97).

b) *Absorption par les feuilles et le tronc. Lessivage.*

Le radiopotassium, comme d'autres radioéléments, a été utilisé pour étudier l'alimentation minérale des plantes par pulvérisation de sels sur les feuilles, les tiges ou le tronc. La technique autoradiographique est particulièrement commode pour mettre en évidence la pénétration et suivre la diffusion dans les plantes des éléments déposés sur ces divers organes. L'efficacité de cette méthode d'alimentation potassique des plantes dépend des espèces, de leur âge, de leur vigueur, de la température, de

l'humidité, du moment de la journée, du pH des solutions et des éléments qu'elles contiennent. L'absorption par les organes aériens, notamment par les feuilles, est en général très rapide (13,15,17,18,19,242,7,36,37,38,42,58). Cependant, si cette méthode permet de pallier momentanément une carence grave, elle ne suffit pas à elle seule à assurer l'optimum de nutrition et doit être considérée comme un complément à la fumure classique. Le végétal n'absorbe pas dans la même proportion les divers éléments par son système foliaire ou radiculaire (66, 98).

Lors de précipitations, l'eau qui s'écoule sur les parties aériennes des végétaux entraîne un certain nombre d'éléments minéraux. L'importance de ce phénomène varie avec l'état des tissus, les heures de la journée et le type d'éléments. ^{42}K a permis de confirmer que le potassium de la plante en voie de croissance est relativement peu lessivable (moins de 1 p. 100 en 24 h) mais le devient beaucoup plus à maturité (30, 33, 63).

c) *Déplacements des ions K dans la plante.*

Le comptage de la radioactivité dans diverses parties de la plante, ou l'autoradiographie, ont permis de suivre les déplacements des ions K dans le végétal après leur absorption par les racines ou les feuilles, et leur répartition dans les divers organes (1). Les tissus jeunes et sains sont ceux qui en contiennent le plus, les organes foliacés (limbe et surtout pétioles) étant les plus riches, ceux de reproduction (grain) présentant les taux les moins élevés. Grâce à ^{40}K, on a pu suivre commodément l'évolution du potassium de la graine en germination ; ce potassium migre dans les radicelles dès leur formation (150). Toutes les graines en voie de gonflement absorbent intensément le potassium (^{42}K), qui sera ensuite transporté activement dans les organes végétatifs (82, 123). ^{42}K a permis de montrer la rapidité des migrations des ions K dans le phloem. L'absorption du potassium (^{42}K) et du sodium (^{22}Na) par des plantules de conifères a un caractère pulsé, avec des périodes de 5 minutes environ, en relation avec des variations rythmiques de l'eau et du biopotentiel de la plante (86).

d) *Autres études réalisées avec du potassium radioactif.*

Les isotopes radioactifs du potassium permettent d'étudier, au niveau de la cellule, les mouvements des ions K et leurs liaisons vis-à-vis de ses divers constituants (8, 83, 103, 127, 151). On a surtout utilisé ^{42}K : dans des études sur la perméabilité cellulaire pour éclairer les mécanismes d'absorption (84, 128, 129, 149), pour préciser le rôle de CO_2, des bicarbonates et des glucides dans l'accumulation des cations chez le végétal (53, 54, 64, 65, 117, 146, 155), ou les relations entre la transpiration et l'absorption du potassium (82, 126, 132).

Le ^{42}K a été utilisé pour étudier la répartition des radicelles de plantes de pâture dans le profil du sol, ainsi que l'absorption du K placé à divers niveaux et les zones préférentielles d'absorption (134). Il a contribué à étudier les relations entre l'absorption de divers ions et la résistance au froid de variétés et d'hybrides doubles de blé (70).

Du potassium radioactif enfermé dans une ampoule de celluloïde, donc non absorbable par les plantes, a largement favorisé la croissance de plantules d'orge déficientes en K (34) ; ^{89}Sr et ^{60}Co (radioactifs) ont d'ailleurs exercé un effet analogue.

IV. — EMPLOI DU RUBIDIUM 86 POUR L'ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DU POTASSIUM DANS LE SOL ET LA PLANTE

Il a été signalé au début de cet article que parmi les métaux alcalins, seul le Rb se rapproche suffisamment du potassium pour que l'on puisse envisager l'utilisation du rubidium radioactif à la place du potassium radioactif, ce qui n'est sûrement pas le cas du lithium (12, 57), ni du césium (49, 50, 51, 52, 74). L'emploi de ^{86}Rb étant beaucoup plus facile que celui de ^{40}K et ^{42}K, de nombreuses études ont été entreprises pour préciser les possibilités d'utilisation du rubidium pour l'étude de la dynamique de K dans le sol (12, 43, 45, 49, 50, 69, 77, 79, 92, 107, 114, 130) ou dans la plante (11, 23, 34, 43, 47, 48, 49, 50, 51, 60, 98, 112, 121, 157).

En faisant varier les concentrations de Rb et de K dans divers sols et divers végétaux, on a montré :

— que la dynamique de Rb et de K dans les sols diffèrent très fortement. L'utilisation du rubidium comme « traceur du potassium » est donc à proscrire dans la majorité des cas, la fixation ou la libération de l'un quelconque de ces deux éléments pouvant l'emporter sur celle de l'autre selon les terres ;

— que dans le végétal, par contre, au cours d'expériences de courte durée, les mécanismes de transport de Rb et de K sont similaires, et ce sont les mêmes transporteurs d'ions qui les véhiculent. Dans les plantes, exception faite des organes de reproduction où la proportion relative de rubidium est plus forte, on observe des rapports K/Rb assez constants dans les divers organes.

De ce fait, l'emploi du ^{86}Rb comme « traceur du potassium » a été presque uniquement le domaine de la physiologie végétale. Il a été surtout utilisé pour l'étude des phénomènes d'absorption chez de nombreux végétaux (orge, haricot, riz, canne à sucre ...) (4, 29, 39, 40, 55, 59, 62, 78, 80, 93, 109, 110, 113, 140, 142, 143).

Son emploi a permis aussi des travaux sur l'absorption et le lessivage foliaire (90, 91, 108, 113, 137, 141, 147), la circulation des ions dans le végétal (39, 41, 144) et leur excrétion dans le milieu (108, 143).

En ce qui concerne le sol, on l'a utilisé dans l'étude de la diffusion et de l'échange des cations (61, 94).

CONCLUSION

L'expérimentation a montré que l'action fertilisante d'éléments, retenus par le pouvoir absorbant du sol, comme P et K, est en général beaucoup plus important à terme que dans l'immédiat. En outre, l'accroissement de la réserve de K échangeable peut produire des suppléments de récolte qui ne peuvent pas être obtenus par l'incorporation récente à un sol pauvre en K d'un sel de potassium quelle qu'en soit la dose.

Il serait donc important de pouvoir suivre, à l'aide d'éléments marqués, l'évolution des ions du sol ou des engrais au cours de longues périodes, de l'ordre de plusieurs

années au moins. Le potassium 40 se prêterait bien à une telle étude ; alors qu'au contraire le radiophosphore, très avantagé par rapport au potassium en ce qui concerne les études à court terme, a une vie beaucoup trop courte pour permettre des études à long terme.

Il reste cependant de larges possibilités d'utilisation du radiopotassium à vie courte (^{42}K) : migration du potassium dans les couches superficielles du sol, comparaison sur ce plan des engrais liquides et solides, influence de l'irrigation à cet égard, influence du contact plante-échangeurs solides du sol sur la diffusion du potassium, spécificité des transporteurs et des compétitions de cations dans la plante.

Reçu pour publication en novembre 1968.

REMERCIEMENTS

Cette étude bibliographique a pu être réalisée grâce aux précieux conseils que m'a prodigués M. G. BARBIER, conseiller scientifique auprès du Département de Biologie du C. E. A. Je tiens à lui exprimer ici ma vive gratitude. Je veux remercier aussi les services de radio-agronomie et de documentation de Cadarache, notamment MM. GUÉRIN de MONTGAREUIL et LAMY pour l'aide qu'ils m'ont apportée.

SUMMARY

UTILIZATION OF POTASSIUM 40 AND POTASSIUM 42 IN AGRONOMY

The use of the radioactive isotopes of potassium as tracers has enabled considerable progress to be made in agronomy. ^{40}K and ^{42}K are the compounds generally used. In a review article the author quotes the results of the main papers, appearing up to 1967. These cover principally studies of ion diffusion in the liquid or solid phase and absorption phenomena by various plant organs (roots, stalk, leaves). Since the use of potassium radioisotopes involves many problems, attempts have been made to use other alkaline metals instead. Only rubidium appears to be retained, although its application is limited to the field of plant physiology. The author offers in conclusion some experimental results of his own, which could provide valuable information to agronomists, engaged in a study of fertilization problems.

ZUSAMMENFASSUNG

VERWENDUNG VON KALIUM 40 UND KALIUM 42 IN DER LANDWIRTSCHAFT

Die Verwendung von radioaktiven Isotopen des Kaliums als Spurelement ermöglichte zahlreiche Fortschritte in der Landwirtschaft. Vorzugsweise werden ^{40}K und ^{42}K verwendet. Der Verfasser führt in einer bibliographischen Untersuchung die Ergebnisse der bis zum Jahre 1967 angestellten Untersuchungen auf. Diese betreffen hauptsächlich die Erforschung der Diffusionsfähigkeit der Ionen in der flüssigen oder festen Phase, sowie die Absorptionserscheinungen bei verschiedenen Organen der Pflanzen (Wurzel, Stengel, Blätter). Da die Verwendung der Radio-Isotope des Kaliums zahlreiche Probleme nach sich zieht, wurde versucht, dieselben durch andere alkalische Metalle zu ersetzen. Es scheint, dass nur das Rubidium mit beschränkter Verwendung in den Bereichen der Pflanzenphysiologie in Frage kommt. Abschliessend schlägt der Verfasser einige Versuche vor, die für sich mit Düngungsproblemen beschäftigenden Landwirten interessant sein dürften.

РЕЗЮМЕ

Применение калия 40 и калия 42 в агрономии.

М. БУА.

Применение радиоактивных изотопов калия в качестве индикаторов сильно способствовало прогрессу агрономических наук. Обычно употреблялись K^{40} и K^{42}. В своем библиографическом очерке автор цитирует результаты главных работо проведенных до 1967-го года по этому вопросу. Работы эти относятся главным образом к способности ионов, находящихся в твердой и жидкой фазах, к диффузии, и к явлениям их поглощения различными органами растения (корни, стебель, листья). Но применение радиоизотопов калия представляет некоторые трудности. Поэтому вместо него были испробованы другие щелочные металы, из которых возможно удержать как-будто один рубидий, и то, исключительно для использования в опытах по физиологии растений.

В заключение, автор предлагает несколько опытов, благодаря которым агрономы занимающиеся вопросами удобрений, могли-бы получить полезные сведения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1939

1 — Upward and lateral movement of salt in certain plants as undicated by radioisotopes of potassium (^{42}K), sodium and phosphore absorbed by roots. *Amer. J. Bot.*, **26**, p. 320-24.

1942

2 — SCHUFFELEN A. C., LOOSJES R. Kinetics of potassium absorption. *Landbouwkund. Tijdschr.*, nº 659, 22-8. *Biol. Abstr.*, **21**, 1222 (1947).

1944

3 — SCHUFFELEN A. C. Soil factors influencing the cation absorption of plants. *Landbouwkund. Tijdschr.*, 116-24. *Biol. Abstr.*, **12**, 1510 (1947).

1946

4 — OVERSTREET R., JACOBSON L. The absorption by roots of rubidium and phosphate ions at extremely small concentrations as revealed by experiments with ^{86}Rb and ^{32}P without carrier. *Amer. J. Bot.*, **33**, 107-112.

1947

5 — BUTLER G. C. Tracers in biology. *Proc. Conf. Nuclear Chem., Chem. Inst. Canad.* (Ottawa), 159-66.

1948

6 — PERRUCHE L. Les isotopes radioactifs en biologie. *La Nature*, 3162, 308-309.

7 — WIKLANDER L., GIESEKING J. E., Exchangeability of adsorbed cation as influenced by the degree of saturation and the nature of the complementary ions with special reference to trace concentrations. *Soil. Sci.*, **66**, 377-84.

1950

8 — HARMAN J. W. Studies on mitochondria. II. The structure of mitochondries in relation to enzymatic activity. *Exper. Cell. Res.*, **1**, 394-402.

1951

9 — RACHINSKII V. V. Tracer atoms and the study of living plants. *Uspekhi Sovremennoi Biol.*, **31**, 376-90.

1952

10 — A conference on the use of isotopes in plant and animal research held on June 12, 13 and 14, 1952. *Argonne National Laboratory.*

11 — BIDDULPH D. Translocation of radioactive mineral nutrients in plants. p. 48-51. Conf. on the use of isotopes in plant and animal research.

12 — EPSTEIN E., HAGEN C. E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. *Plant Physiol.*, **27**, 457-74.

13 — MAYBERRY B. D. Growth and development of vegetable crops as influenced by foliage application of sucrose and major nutrient elements. *Univ. Microfilms. Ann. Arbor. Mich.*, Pub. nº 4319, ; *Dissert. Abstr.*, **12**, 774.

14 — TAIT J. F., WILLIAMS E. S. Assay of mixed radioisotopes. *Nucleonics*, **10**, nº 12, 47-51.

15 — TUKEY H. B., TICKNOR R. L., HINSVARK O. H., WITTWER S. H. Absorption of nutrients by stems and branches of woody plants. *Science*, **116**, 167-8.

1953

16 — SCHUFFELEN A. C. The importance of tracers in fertilizer experiments. *Meded. Dir. Tumb*, **15**, 610-624.

17 — TICKNOR R. L. *The entry of nutrients through the bark and leaves of deciduous fruit trees as indicated by radioactive isotopes* (thesis). 101 p. Contract At (11-1)-159.

18 — TUKEY H. B., TICKNOR R. L., HINSVARK O. H., WITTWER S. H. *Absorption of nutrients by stems and branches of woody plants.* 6 p.

19 — SWANSON C. A., WHITNEY J. B. The translocation of foliar-applied phosphorus and other radioisotopes in bean plants. *Amer. J. Bot.*, **40**, 816-23.

20 — LUMBROSO R. Application of radiotracers to the study of ion-exchange resins. *J. recherches centre natl. recherche sci., Labs.* Bellevue (Paris) nº 22, 36-9.

1954

21 — GEILMANN W., GANSSLE A. Errors in the determination of alkalies in silicates. *Glastech. Ber.* **27**, 80-8.

22 — SCHUFFELEN A. C. The absorption of potassium by the plant. Potassium Symposium. *Ann. Meeting Board Tech. Advisers Intern. Potash Inst.*, Zurich, 169-81.

1955

23 — MACKIE W. Z., FRIED M. Relative distribution of K and ^{86}Rb within core plants grown in the field. *Soil Sci.*, **80**, 309-312.

24 — LONG W. G., TUEBNER F. G., WITTWER S. H. The effects of internal and external factors upon foliar absorption and distribution of radiophosphorus potassium and rubidium in plants. *Abs. Plant Physiol.*, **30**, Suppl., 18.

25 — POMOT J., LECAT P. Méthode rapide de détermination de la valeur humique des amendements. Application à l'étude de quelques produits humiques. *C. R. Acad. Agric.*, Paris, **41**, 379-382.

26 — JONAS H. Localizing scintillation counting-rate meter. *Nucleonics*, **13**, nº 10, 64-5.

27 — LECAT P. Study of the physiology of potassium sprayed on leaves of grape vines by radioactive potassium. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **41**, 712-13.

1956

28 — A conference on radioactive isotopes in agriculture held at Michigan state university on January 12, 13 and 14.

29 — KRAMER P. U. Relative amount of mineral absorption (^{86}Rb) through various regions of roots. p. 287-296. Conf. on radioactive isotopes in agriculture.

30 — LONG W. G., SWEET D. V., TUKEY H. B. The lose of nutrients by leaching of the foliage. *Mich. agric. Exper Stn. quart. Bull.*, **36**, 528-532.

31 — WALLACE A. Influence of cation ratio, temperature and time on adsorption and absorption of calcium and potassium by citrus and other plant species. *Soil Sci.*, **82**, 9-19.

32 — TENDILLE C., GRENIER DE RUÈRE J., BARBIER G. Isotopic exchange of the less mobile potassium of the soil. *C. R. Acad. Sci.*, **243**, 87-9.

33 — LONG W. G., SWEET D. V., TUKEY H. B. Loss of nutrients from plant foliage by leaching as indicated by radioisotopes. *Science*, **123**, 1039-40.

34 — PANTELEEVA E. I., Results of radioactive potassium on growth of plants. Zapiski Leningrad. *Sel'skokhoz. Inst.*, nº **11**, 208-11.

35 — WALLACE A., SMITH. R. L. Use of radioactive potassium in soil-plant studies. *Better Crops with Plant Food*, nº **1**, 15-20, 43-7.

36 — JONAS H. Dynamics of ^{42}K uptake by sunflower plants with the aid of a scintillation count-meter. *Protoplasma*, **57**, 67-76.

37 — WITTWER S. H., TUKEY H. B., TEUBNER F. G., LONG G. Current status of nutritional spraying as revealed by radioactive isotopes. *J. California Hort. Soc.*, **17**, 50-7. *Biol. Abstr.*, **31**, Abstr., nº 29536.

1957

38 — T'YUKI G. B., VITVER S. G., T'YUBNER F. D. The use of radioactive isotopes for studying the effectiveness of nutrient absorption by plant leaves. *Premen. radioaktiv. Izotop. Prom. Madits. S.-kh. Akad. Nauk*, **445-465**, R. 3h. (Biol.).

39 — BURR G. O., HARTT C. E., TANIMOTO T., TAKAHASHI D. Circulatory system of the Sugarcane plant. *Conf. intern. radioisotopes dans la recherche scientifique*. Paris.

40 — SCOTT-RUSSEL R., SHORROCKS V. M. The effect of transpiration on the absorption of inorganic ions by intact plants. *Conf. intern. radioisotopes dans la recherche scientifique*. Paris.

41 — HELDER R. J. Exchange and circulation of labelled ions in young intact plants. *Conf. internation. radioisotopes dans la recherche scientifique*. Paris.

1958

42 — OKUDA A., KASAI Z., NAKADA H., ASADA K., YAMADA Y. Studies of crop nutrition using radioactive potassium as a tracer. *Mem. Res. Inst. Food Sci.*, Kyoto Univ. n° 15, 16-22.

1959

43 — FRIED M., HAWKES G., MACKIE W. Z. Rubidium-potassium relations in the soil-plant system. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**. 360-2.

44 — PANTELEEVA E. I., LATSIS M. M. Uptake of stable and radioactive isotopes of potassium by barley. *Dopovidi Ukr. Akad. Sil's'kogospoda dars'k. Nauk.*, **2**, n° 2, 18-22.

45 — OIEN A., SEMB G., STEENBERG K. Comparison of leaching and fixation of potassium and rubidium in soils using the isotopes ^{42}K and ^{86}Rb. *Soil Sci.*, **88**, 284-7.

1960

46 — ROSSELER M. Quantitative determination of Potassium by measuring the activité of K^{40}. *Kernenergie*, **3**, 388-90.

47 — NAKAMIGAWA K., OKUDA A. Physiological role of K. II. Rb as the substitute for K for the growth of higher plants. *Nippon Dojo-Hiryogaku Zasshi*, **31**, 279-80.

48 — NAKAMIGAWA K. OKUDA A. Physiological role of K. III. Substitution of Rb for K. *Nippon Dojo-Hiryogaku Zasshi*, **31**, 352-4.

49 — CLINE J. F. Potassium, Cesium-137 and Rubidium-86 relationships in plant uptake, soil diffusion rates and irrigation practices, 12 p. General electrric Co. Hanford Atomic products operation, (Richland, wash.)

50 — CLINE J. F. Potassium, Cesium-137, and Rubidium-86 relationships in plants and soil., p. 34-6.

51 — CLINE J. F., HUNGATE F. P. Accumulation of potassium, Cesium 137 and Rubidium 86 in bean plants grown in nutrient solutions. *Plant Physiol.*, **35**, 826-9.

52 — MIDDLETON L. J., HANDLEY R., OVERSTREET R. Relative uptake and translocation of potassium and cesium in barley. *Plant Physiol.*, **35**, 913-18.

53 — HUFFAKER R. C., CLARK R. B., MUELLER R. T., WALLACE A. Relative importance of bicarbonate versus carbon dioxide in reactions, including potassium bicarbonate accumulation by bush beans. *Soil Sci.*, **89**, 264-8.

54 — BHAN K. C., WALLACE A. Possible relations of bicarbonate or carbon dioxide assimilation to cation accumulation by plant roots. *Soil Sci.*, **89**, 276-84.

1961

55 — OLSEN S. R. *Soil Chem. Plant Nutrit.*, p. 160-8 of « Applications of radioisotopes and Radiation in the Life Sciences ».

56 — MENGEL K. Donnan distribution of cations in the free space of the plant root and its importance for active cation uptake. *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenk.*, **95**, 240-53.

57 — RIK G. R., PETROVA O. N., MISYUK L. A., PLATONOVA L. V. Change of the isotope composition of Sr, Rb, Ca, K and Li when absorbed by plants from culture solution. *Biofizika*, **6**, 740-4.

58 — TUKEY H. B., WITTWER S. H., BUKOVAC M. J. Absorption of radionuclides by above-ground plant parts and their movement within the plant. *J. Agric. Food Chem.*, **9**, 106-13.

1962

59 — VALLEE-SHEALTIEL M. The influence of concentration on the uptake of rubidium 86 by excised barley roots. *Radioisotopes Soil-Plant Nutr. Studies, Proc. Symp. Bombay*, 239-48.

60 — HIGINBOTHAM N., PRATT J., FOSTER R. J. Effects of calcium, indoleacetic acid, and distance from stem apex on potassium and rubidium absorption by excised segments of etiolated pea epicotyl. *Plant Physiol.*, **37**, 203-14.

61 — MOKADY R., SHAINBERG I., HAGIN J., BRESLER E. Cation exchange phenomena as affected by the soil moisture content. I. Cation exchange capacity. p. 31-41 of *Radioisotopes in Soil-Plant Nutrition Studies*. Vienna, International Atomic Energy Agency.

62 — WALKER J. M., BARBER S. A. Absorption of K and Rb from the soil by corn roots. *Plant Soil*, **17** (2), 243-59.

63 — TUKEY H. B. The loss of organic and inorganic materials by leaching from leaves and other above-ground plant parts. *Radioisotopes in Soil-Plant Nutrition Studies*, p. 289-302. Vienna, International Atomic Energy Agency.

64 — MENGEL K. The effect of the metabolism on the uptake and distribution of labeled K in sunflowers. *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenk.*, **98**, nº 1, 57-63.

65 — MENGEL K. The uptake of K and Ca by the plant depending on the carbohydrate content of its roots. *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenk.*, **98**, nº 1, 44-54.

66 — OKUDA A., YAMADA Y. Foliar absorption of nutrients. III. Comparison of foliar absorption with root absorption in potassium phosphate double-labeled with ^{42}K and ^{32}P. *Soil Sci. Plant Nutrit.*, **2**, 14-18.

67 — FISCHER L., MARX G. Determination of transference numbers by the moving-boundary method by use of tracer isotopes. A new procedure. *Naturwissenschaften*, **49**, 606.

68 — YOSHIDA D. Nutrients absorbed by tobacco plant. IV. Effect of N forms on K. *Nippon Dojo-Hiryogaku Zasshi*, **33** (5), 231-5.

69 — BOWEN H. J. M., CAWSE P. A., THICK J. The distribution of some inorganic elements in plant tissue extracts. *J. exper. Bot.*, **13**, 257-67.

70 — BUIKAN D. Interrelation between absorption of labeled major and trace elements and frost hardiness of wheat. *Fiziol. Rast.*, **9**, 189-92.

71 — COBB NEVILLE M. *The action of calcium ion on the entry of the monovalent cations into barley roots.* Ph. D. University of Pennsylvania, nº 68-850.

72 — ROOSEVELT FISHER T. *Measurements of adsorbed cations in soils employing radioactive isotope equilibration methods.* Ph. D. University of Missouri, nº 62-6 405.

73 — BARBIER G. La dynamique du potassium dans le sol. *Potassium Symp.*, **7**, 231-58.

74 — NISHITA H., TAYLOR P., ALEXANDER G. V., LARSON K. H. Influence of stable Cs and K on the reactions of ^{137}Cs and ^{42}K in soils and clay minerals. *Soil Sci.*, **94**, 187-97.

75 — SUMNER M. E., BOLT G. H. Isotopic exchange of potassium in an illite under equilibrium conditions. I. A. E. A. Seminar on the pratical applications of short-lived radioisotopes produced in small research reactors, Vienne, 14 p.

1963

76 — SMIRNOV L. E., NATAL'INA V. N., KUZNETSOV R. I. Express method for the determination of potassium in soil. *Zh. Analit. Khim.*, **18** (9), 105-3.

77 — PLACE G. A. The effect of soil moisture on diffusion and root physiology and their relation to potassium and ^{86}Rb uptake. Ph. D., Purdue University, nº 63-6 529.

78 — FRANKLIN R. E., MCLEAN Jr E. O. Effet of electrolyte concentration on Donnan systems and the resulting uptake of cations by plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27** (2), 137-4.

79 — LE ROUX F. H., COLEMAN N. T. Ion sorption by soil separates and exchange equilibriums involving sodium, potassium and rubidium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27** (6), 619-23.

80 — MENGEL K. Influence of addition of adenosine triphosphate and growth regulators on rubidium absorption by excised barley roots. *Physiol. Plant.*, **16** (4), 767-76.

81 — EPSTEIN E., RAINS D. W., ELZAM O. E. Resolution of dual mechanisms of K absorption by barley roots. *Proc. nation. Acad. Sci. U. S.*, **49**, 684-92.

82 — UDOVENKO G. V., URBANIVOCH T. A. Potassium and chlorine uptake by germinating seeds and their effect on respiration of seeds and sprouts. Rol Mikroelem. *Protsesse Rosta Razv. Rast., Dokl. Nauch. Konf., Vilnyus*, 109-12.

83 — HOPE A. B. Ionic relations of cells of Chara australis. VI. Fluxes of potassium. *Australian J. Biol. Sci.*, **16**, 429-41.

84 — UDOVENKO G. V. Support for the adsorption theory of the permeability of cells in higher plants. *Vestsi Akad. Navuk Belarusk S. S. R., Ser. Biyal. Navuk* (3), 24-32.

85 — GRAHAM-BRYCE I. J. Self-diffusion of ions in soil. I. Cations. *J. Soil Sci.*, **14** (2), 188-94.

86 — GLADUNOV I. M. Rhythmicity of potassium and sodium uptake by the roots of coniferous seedlings. *Tr. Leningrad. Lesotekh. Akad.*, **104**, 65-73 .

1964

87 — BARANOV V. I. Natural radioactivity. *Izv. Akad. Nauk S. S. S. R., Ser. Biol.*, **29** (1), 159-63.

88 — DEMENTEV V. A., FURMAN A. O. Determination of small specific activities by measurements of high-energy β-radiation. *Dokl. Ross. Sel'skohoz. Akad.*, **99**, 537-46.

89 — HARRIS W. G., KESSIER W. V., CHRISTIAN J. E., SCHALL E. D. Fertilizer analysis : determination of potassium in solids and liquids by measurement of the gamma activity of naturally radioactive potassium 40. *J. agric. Food. Chem.*, **12**, 144-6.

90 — PLACE G. A., BARBER S. A. The effect of soil moisture and rubidium concentration on diffusion and uptake of rubidium 86. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 239-43.

91 — WITTWER S. H., YAMADA Y., JYUNG W. H., BUKOVAC M. J. Mechanisms of ion uptake by leaves of higher plants as revealed by radioisotopes. *U. S. At. Energy Comm.* TID 20184, 5 p.

92 — MARCKWORDT U., NIEDERBUDDE E. A. Tracer investigations on the availability of potassium in soils. *Landwirtsch. Forsch.*, nº **18**, 74-83.

93 — FRERE M. H., AXLEY J. H. Cation uptake by excised barley roots from solutions and suspensions. *Soil Sci.*, **97** (3), 209-13.

94 — EVANS S. D., BARBER S. A. The effect of cation-exchange capacity, clay content, and fixation on rubidium 86 diffusion in soil and kaolinite systems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 53-6.

95 — LAMBERT R. G., LINCK A. J. Comparison of the uptake of ^{32}P and ^{42}K by intact alfalfa and coat roots. *Plant Physiol.*, **39**, 920-4.

96 — DE HAAN F. A. M., BOLT G. H., PIETERS B. G. M. Application of radioactive K-isotopes to the determination of K-adsorption and K-release characteristics of potassium-containing materials. *Intern. J. Appl. Radiation Isotopes*, **15**, 221-9.

97 — LANG I., KOZAK M. Potassium uptake of winter rye seedlings as affected by various clay minerals. *Agrokem. Talajtan Suppl.*, **13**, 109-16.

98 — SMITH R. C., EPSTEIN E. Ion absorption by shoot tissus ; kinetics of potassium and rubidium absorption by corn leaf tissue. *Plant Physiol.*, **39** (6), 992-6.

99 — BRODA E., FINDENEGG G., DESSER H. Do ammonia and potassium compete in plant cells? *Naturwissenschaften*, **51** (18), 436-7.

100 — UDOVENKO G. V., IVANOV N. P., LOZHKINA N. N., URBANOVICH T. A. Potassium uptake by plants from nutrient solutions depending on the composition of the solutions. *Fiziol. Rast.*, **11** (4), 638-48.

101 — MIRIANASHVILI G. S., KAVILADZE M. S. H., ABASHIDZE I. V., MACHARASHVILI G. R., PATEISHVILI M. A. Variation of composition of potassium isotopes in plants. *Soobshch. Akad. Nauk. Gruz. S. S. R.*, **34** (3), 565-8.

102 — PITMAN M. G. The effect of divalent cations on the uptake of salt by beet root tissue. *J. Exper. Bot.*, **12** (45), 444-56.

103 — SINYUKHIN A. M., OZOLINA I. A., Ionic fluxes in a resting or excited single plant cell. *Dokl. Rossiisk. Sel'skokhoz. Akad. im. K. A. Timiryazeva*, nº **99**, 383-8.

104 — VAN STEVENINCK R. F. M. Comparison of chloride and potassium fluxes in red beet tissue. *Physicl. Plantarum*, **17** (4), 757-70.

105 — ZHUKOV M. S. Étude comparative du rôle du potassium et du sodium dans la vie des plantes. *Fiziol. Rusten. S. S. S. R.*, **11**, 2, 181-7.

106 — MENGEL K. Influx and efflux of potassium in young barley roots. *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenk.*, **106** (3), 194-206.

1965

107 — KOZAK M. Utilization of isotopes ^{86}Rb in investigations concerning potassium fixation in soils. *Meded. Landbouwhogeschool Opzoekingssta. Staat Gent*, **30** (2), 1125-40.

108 — MENDEL K. The release of potassium of intact barley plants to the nutrient medium. *Kalibriefe, Fachgebiet*, **2** (3), 1-6.

109 — RIEKERK H., GESSEL S. P. Mineral cycling in a *Douglas* fir forest stand. *Health Phys. G. B.*, **11**, nº 12, 1363-9.

110 — FRIED M., TENSHO K., ZSOLDOS F. Effect of reduced oxygen tension on the uptake on inorganic ions by rice and barley. *Isotopes Radiation Soil-Plant Nutr. Studies, Proc. Symp. Ankara*, 233-40.

111 — GUÉRIN DE MONTGAREUIL P. *Les recherches françaises en agronomie nucléaire.* Rapport CEA-R 2534.

112 — MACKIE W. Z., FRIED M. Relative distribution of potassium and rubidium-86 within corn plants grown in the field. *Soil Sci.*, **80**, 309-12.

113 — HALEVY A. H., WITTMER S. H. Foliar uptake and translocation of rubidium in bean plants as affected by root absorbed growth substances. *Plant Physiol.*, U. S. A., **50**, suppl. XXIV.

114 — WELTE E., MARCKWORDT U. ^{86}Rb as a tracer for K in soil experiments. *Isotopes Radiation Soil-Plant Nutr. Studies Proc. Symp., Ankara* 301-9, discussion 409-10.

115 — PETERBURGSKII A. V. The application of ^{45}Ca and ^{42}K in the study of calcium and potassium uptake and distribution in plants. *Izv. Timiryazevsk. Sels'skokhoz. Akad.* (2) 116-25.

116 — VAN STEVENINCK R. F. M. The effects of calcium and tris (hydroxymethyl) aminomethane on potassium uptake during and after the lag phase in red beet tissue. *Australian J. Biol. Sci.*, **15** (2), 227-33.

117 — NOBEL P. S., PACKER L. Light-dependent ion translocation in spinach chloroplasts. *Plant Physiol.*, **40** (4), 633-40.

118 — PITMAN M. G. Sodium and potassium uptake by seedlings of *Hordeum vulgare*. *Australian J. Biol. Sci.*, **18** (1) 10-24.

119 — PITMAN M. G. Ion exchange and diffusion in roots of *Hordeum vulgare*. *Australian J. Biol. Sci.*, **18** (3), 541-6.

120 — FINDENEGG G., BRODA E. Influence of ammonium ion on the uptake of potassium by barley roots. *Naturwissenschaften*, **52** (12), 350.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE - CENTRE DE GRIGNON
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL

121 — ENAYAT A., HOEFNER W. The effect of kinetin upon the distribution of inorganic substances in isolated leaves of *Nicotiana tabacum*. *Planta*, **66** (3), 221-8.

122 — EPSTEIN E., RAINS D. W. Carrier-mediated cation transport in barley roots ; kinetic evidence for a spectrum of active sites. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S.*, **53** (6), 1320-4.

123 — GREENWAY H., PITMAN M. G. Potassium translocation in seedlings of *Hordeum vulgare*.. *Australian J. Biol. Sci.*, **18** (2), 235-47.

124 — TAGHON E., BAERT L., VAN DEN HENDE A. Potassium exchange and potassium fixation in a clay soil, studied with ^{42}K. *Meded. Landbouwhogeschool Opzoekingssta. Staat Gent.*, **30** (2), 1141-8.

125 — OLSON, JERRY S. Use of tracer techniques for the study of biogeochemical cycles. 42p. 1st Intern. Symposium on ecosystems, Copenhagen.

126 — PITMAN M. G. Transpiration and the selective uptake of potassium by barley seedlings (*Hordeum vulgare cv. Bolivia*). *Austral. J. biol. Sci.*, **18**, nº 5, 967-98.

127 — GRODZINSKIJ D. M., GOLIGOVA O. P. Contribution au problème des types de liaison du potassium dans les tissus végétaux. *Biofizika, S. S. S. R.*, **10**, nº 3, 534-7.

128 — MENGEL K., SCHNEIDER B. Potassium uptake as a function of the influx rate and the cell permeability mathematically and experimentally demonstrated by the potassium uptake of young barley roots. *Physiol. Plantarum*, **18**, 1105-14.

129 — HAUNOLD E., DAN O., KAINDL K. Potassium 42 uptake by maize roots. *Isotopes Radiation Soil-plant Nutr. studies., Proc. Symp. Ankara*, 311-17, discussion 317-21.

130 — KOZAK M. Utilization of the ^{86}Rb isotope in investigation potassium change of soils. II. Dynamics of ^{86}Rb -labeled potassium various soils. *Agrokem. Talajtan*, **14** (3-4), 171.

131 — BANGE G. G. J. Upward transport of potassium in maize seedlings. *Plant and Soil*, **22**, nº 2, 280-306.

132 — BOWLING D. J. F., WEATHERLEY P. E. The relationship between transpiration and potassium uptake in *Ricinus communis*. *J. exper. Bot., G. B.*, **16**, nº 48, 732-41.

133 — COOIL B. J., LAFUENTE R. K. (de), LAPENA R. S. (de). Absorption and transport of sodium and potassium in squash. *Plant Physiol., U. S. A.*, **40**, nº 4, 615-32.

134 — OZANNE P. G., ASHER C. J., KIRTON D. J. Root distribution in a deep sand and its relation to the uptake of added potassium by pasture plants. *Australian J. Agric. Res.*, **16**, 5, 785-800.

135 — FRANKLIN R. E. Ionic relations in clay suspensions and dialyzates. I. Rubidium 86 as a tracer for potassium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, (5), 508-10.

136 — DE HAAN F. A. M., BOLT G. H., PIETERS B. G. M. Diffusion of potassium 40 into an illite during prolonged shaking. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29** (5), 528-30.

1966

137 — LUTTGE U., LATIES G. G. Dual mechanisms of ion absorption in relation to long distance transport in plants. *Plant Physiol.*, **41** (9), 1531-9.

138 — REDIES M., VIMPANY I. Determination of total potassium in soils using the gamma emission of K^{40}. *Nature*, **210**, 1978-9.

139 — NISHITA H., STEEN A J., WOOD R. A. Gamma spectrometry of neutron activated soils. *Health Phys.*, **12**, 1299-1305.

140 — CROSSET R. N. Movement of rubidium across the root of *Hordeum vulgare*. *New Phytol.*, **65** (4), 443-58.

141 — MECKLENBURG R. A., TUKEY H. B., MORGAN V. J. A mechanism for the leaching of calcium from foliage. *Plant Physiol.*, **41**, nº 4, 610-3.

142 — WAISEL R., NEUMANN Y., ESHEL Y. The nature of the pH effect on the uptake of rubidiumby excised barley roots. *Physiol. Plantarum*, **19** nº 1, 115-21.

143 — KYLIN A. Uptake and loss of Na^+, Rb^+ and Cs^+ in relation to an active mechanism for extrusion of Na^+ in *Scenedesmus*. *Plant Physiol.*, U. S. A., **41** nº 4, 579-84.

144 — HODGES T. K. Oligomycin inhibition of ions transport in plant roots. *Nature*, **209**, nº 5021, p. 425-426.

145 — PITMAN M. G. Uptake of potassium and sodium by seedlings of *Sinapis alba*. *Austral. J. biol. Sci.*, **19**, nº 2, 257-69.

146 — WALLACE A., SOUFI S. M., HAMAIDAN N. Day-night differences in the accumulation and translocation of ions by tobacco plants.. *Plant Physiol.*, U. S. A., **41**, nº 1, 102-4.

147 — OERTLI J. J. Active water transport in plants. *Physiol. Plantarum*, **19** (31), 809-17.

148 — FRANKLIN R. E. Exchange and absorption of cations by excised roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, nº 2, 177-81.

149 — POOLE R. J. The influence of the intracellular potential on potassium uptake by beetroot tissue. *J. gen. Physiol.*, **49**, nº 3, 551-63.

150 — PESEK F. The translocalization of the natural radioactive isotope K^{40} in the germinating seed of *Triticum aestivum*. *Acta Agron. Acad. Sci. Hung.*, **15** (1-2), 45-8.

151 — SINYUKHIN A. M., OZOLINA I. A. Ion-structure changes in plant cells during stimulation. *Tr. Univ. Drzhby Nar.*, **14**, *Sel'skokhoz. Nauki*, nº 1, 186-214.

152 — WALLACE A. Anion and ammonium nitrogen effects on ^{86}Rb and ^{42}K accumulation and translocation by bush bean plants. *Curr. Top. Plant Nutr.*, 94-8.

153 — RESNIK M. E., WALLACE A., LUNT O. R. Some effects of calcium and of concentration on potassium accumulation by barley and bush bean. *Curr. Top. Plant Nutr.* E 105-9.

154 — WALLACE A. Cation accumulation by phosphorus-deficient bush bean plants. *Curr. Top. Plant Nutr.*, 89-90.

1967

155 — JACOBSON L., SCHAEDLE M., COOPER B., YOUNG L. C. T. The effect of carbon dioxide on the uptake of ions. *Isotope Plant. Nutr. physiol., Proc. Symp.* Vienna 1966, 303-16.

156 — DEIST J., TALIBUDDEN O. Ion exchange in soils from the ion pairs K-Ca, K-Rb, and K-Na. *J. Soil Sci.*, **18** (1), 125-37.

157 — WEST R., PITMAN M. G. Rubidium as a tracer for potassium in the marine algae, *Ulva lactuca* and *Chaetomorpha darwinii*. *Nature*, **214** (5094), 1262-3.

INDEX

B

BANGE G. G. J., 1965, **131.**
BARANOV V. I., 1964, **87.**
BARBIER G., 1962, **73.**
BHAN K. C., WALLACE, A., 1960, **54.**
BIDDULPH., 1952, **11.**
BOWEN H. J. M., CAWSE P. A., THICK J., 1962, **69.**
BOWLING D. J. F., WEATHERLEY P. R., 1965, **132.**
BRODA E., FINDENEGG G., DESSER H., 1964, **99.**
BUIKAN D., 1962, **70.**
BURR G. O., HARTT C. E., TANIMOTO T., TAKAHASHI D., 1957, **39.**
BUTLER G. C., 1947, **5.**

C

CLINE J. F., 1960, **49.**
CLINE J. F., 1960, **50.**
CLINE J. F., HUNGATE F. P., 1960, **51.**
COBB NEVILLE M., 1962, **71.**
COOIL B. J., LAFUENTE R. K. (de), LAPENA R. S. (de), 1965, **133.**
CROSSET R. N., 1966, **140.**

D

DEIST J., TALIBUDEEN O., 1966, **156.**
DEMENTEV V. A., FURMAN A. O., 1964, **88.**

E

ENAYAT A., HOEFNER W., 1965, **121.**
EPSTEIN E., HAGEN C. E., 1952, **12.**
EPSTEIN E., RAINS D. W., ELZAM D. E., 1963, **81.**
EPSTEIN E., RAINS D. W., 1965, **122.**
EVANS S. D., BARBER S. A., 1964, **94.**

F

FINDENEGG G., BRODA E., 1965, **120.**
FISHER L., MARX G., 1962, **67.**
FRANKLIN R. E. Jr, MCLEAN E. D., 1963, **78.**
FRANKLIN R. E., SNYIER., 1965, **135.**
FRANKLIN R. E., 1966, **148.**
FRERE M. H., AXLEY J. H., 1964, **93.**
FRIED M., HAWKES G., MACKIE W. Z., 1959, **43.**
FRIED M., TENSHO K., ZSOLDOS F., 1965, **110.**

G

GEILMANN W., GANSSLE A., 1954, **21.**
GLADUNOV I. M., 1963, **86.**
GRAHAM-BRYCE I. J., 1963, **85.**
GREENWAY H., PITMAN M. G., 1965, **123.**
GRODZINSKIJ D. M., GOLIGOVA D. P., 1965, **127.**

H

HAAN (de) F. A. M., BOLT G. H., PIETERS B. G. M., 1964, **96.**
HAAN (de) F. A. M., BOLT G. H., PIETERS B. G. M., 1965, **136.**
HALEVY A. H., WITTMER S. H., 1965, **113.**
HARMAN J. W., 1950, **8.**
HARRIS W. G., KESSIER W. V., CHRISTIAN J. E., SCHALL E. D., 1964, **89.**
HAUNOLD E., DAN O., KAINDL. K., 1965, **129.**
HELDER R. J., 1957, **41.**
HIGINBOTHAM N., PRATT M. J., FOSTER R. J., 1962, **60.**
HODGES T. K., 1966, **144.**
HOPE A. B., 1963, **83.**
HUFFAKER R. C., CLARK R. B., MUELLER R. T., WALLACE A., 1960, **53.**

J

JACOBSON L., SCHAEDLE M., COOPER B., YOUNG L. C. T., 1967, **155.**
JONAS H., 1955, **26.**
JONAS H., 1956, **36.**

K

Kozak M., 1965, **107**.
Kozak M., 1965, **130**.
Kramer P. U., 1956, **29**.
Kylin A., 1966, **143**.

L

Lambert G., Linck A. J., 1964, **95**.
Lang I., Kozak M., 1964, **97**.
Le Roux F. H., Coleman N. T., 1963, **79**.
Lecat P., 1955, **27**.
Long W. G., Tuebner F. G., Wittwer SH., 1955, **24**.
Long W. G., Sweet D. V., Tukey H. B., 1956, **30**.
Long W. G., Sweet D. V., Tukey H. B., 1956, **33**.
Lumbroso R., 1953, **20**.
Luttge U., Laties G. G., 1966, **137**.

M

Mackie W. Z., Fried M., 1955, **23**.
Mackie W. Z., Fried M., 1965, **112**.
Marckwordt U., Niederbudde E. A., 1964, **92**.
Mayberry B. D., 1952, **13**.
Mecklenburg, Tukey, Morgan, 1966, **141**.
Mengel K., 1961, **56**.
Mengel K., 1962, **64**.
Mengel K., 1962, **65**.
Mengel K., 1963, **80**.
Mengel K., 1964, **106**.
Mengel K., 1965, **108**.
Mengel K., Schneider B., 1965, **128**
Middleton L. J., Handley R., Overstreet R., 1960, **52**.
Mirianashvili G. G., Kaviladze M. S. H., Abashidze I. V., Macharashvili G. R.,1964, **101**.
Mokady R., Shainberg I., Bresler E., 1962, **61**.
Montgareuil (Guérin de), 1965, **111**.

N

Nakamigawa K., Okuda A., 1960, **47**.
Nishita H., Taylor P., Alexander G. V., Larson K. H., 1962, **74**.
Nishita H., Steen A. J., Wood R. A., 1966, **139**.
Nobel P. S., Packer L., 1955, **117**.

O

Oertli J. J., 1966, **147**.
Oien A., Semb G., Steenberg K., 1959, **45**.
Okuda A., Kasai Z., Nakada H., Asada K., Yamada Y., 1958, **42**.
Okuda A., Yamada Y., 1962, **66**.
Olsen S. R., 1961, **55**.
Olson, Jerry S., 1965, **125**.
Overstreet R., Jacobson L., 1946, **4**.
Ozanne P. G., Asher C. J., Kirton D. J., 1965, **134**.
Ozolina I. A., Sinyukhin A. M., 1964, **103**.

P

Panteleeva E. I., 1956, **34**.
Panteleeva E. I., Latsis M. M., 1959, **44**.
Perruche L., 1948, **6**.
Pesek F., 1966, **150**.
Peterburgskii A. V., 1965, **115**.
Pitman M. G., 1964, **102**.
Pitman M. G., 1965, **118**.
Pitman M. G., 1965, **119**.
Pitman M. G., 1965, **126**.
Pitman M. G., 1966, **145**.
Place G. A., 1962, **77**.
Place G. A., Barber A., 1964, **90**.
Pomot J., Lecat P., 1955, **25**.
Poole R. J., 1966, **149**.

R

Rachinskii V. V., 1951, **9**.
Redies M., Vimpany, 1966, **138**.
Resnik M. E., Wallace A ., Lunt O., 1966, **153**.
Riekerk M., Gessel S. P., 1965, **109**.
Rik G. R., Petrova O. N., Misyuk L. A., Platonova L. V., 1961, **57**.
Roosevelt Fisher T., 1962, **72**.
Rosseler M., 1960, **46**.

S

Schuffelen A. C., Loosjes R., 1942, **2**.
Schuffelen A. C., 1944, **3**.
Schuffelen A. C., 1953, **16**.
Schuffelen A. C., 1954, **22**.
Scott Russel S. R., Shorrocks B. M. 1957, **40**.
Sinykhin A. M., Ozolina I. A., 1964, **103**.
Sinyukhin A. M., Ozolina I. A., 1966, **151**.
Smith R. C., Epstein E., 1964, **98**.
Smnirnov L. E., Natalina V. N., Kuznetsov., 1963, **76**.
Sumner M. E., Bolt G. H., 1962, **75**.
Swanson C. A., Whitney J. B., 1953, **19**.

T

Taghon E., Baert L., Van den Hende, 1965, **124**.
Tait J. F., Williams E. S., 1952, **14**.
Tendille C., de Ruere J. G., Barbier G., 1956, **32**.
Ticknor R. L., 1953, **17**.
Tukey H. B., Ticknor R. L., Hinsvark O. H., Wittwer S. H., 1952, **15**.
Tukey H. B., Ticknor R. L., Hinsvark O. H., Wittwer S. H., 1953, **18**.
Tukey H. B., Wittwer S. H., Bukovac M. J., 1961, **58**.
Tukey H. B., 1962, **63**.
T'yuki G. B., Vitver S. G., T'yubner F. D., 1957, **38**.

U

Udovenko G. V., Urbanivoch T. A., 1963, **82**.
Udovenko G. V., 1963, **84**.
Udovenko G. V., Ivanov N. P., Lozhkina N., Urbanovitch, 1964, **100**.

V

Vallee-Shealtiel M., 1962, **59**.
Van Steveninck R. F. M., 1964, **104**.
Van Steveninck R. F. M., 1965, **116**.

W

Waisel, Neumann, Eshel, 1966, **142**.
Walker M., Barber S. A., 1962, **62**.
Wallace A., 1956, **31**.
Wallace A., Smith R. L., 1956, **35**.
Wallace A., Soufi S. M., Hamaidan N., 1966 **146**.
Wallace A., 1966, **152**.
Wallace A., 1966, **154**.
Welte E., Marckwordt U., 1965, **114**.
West R., Pitman M. G. 1967, **157**.
Wiklander L., Gieseking J. E., 1948, **7**.
Wittwer S. M., Tukey H. B., Teubner F. G., Long G., 1956, **37**.
Wittwer S. M., Yamada Y., Jyung W. H., Bukovac M. J., 1964, **91**.

Y Yoshida D., 1962, **68**.

Z Zhukov M. S., 1964, **105**.

Ann. agron., 1969, **20** (1), 105-106.

CHRONIQUE DES LIVRES

McLaren A. D. et Perterson G. H. — Soil biochemistry. — New York Marcel Dekker Inc., 1967, 509 p.

Cet ouvrage est une suite de 17 mises au point groupées en trois parties d'importance inégale :

1. *Isolation et caractérisation des composés biochimiques du sol.*

Les techniques de fractionnement, de caractérisation, la nomenclature des composés azotés, des acides nucléiques, des phosphates organiques, des hydrates de carbone, des acides organiques et des radicaux libres sont passées en revue.

2. *Métabolisme des composés biochimiques du sol.*

Aux chapitres sur les cycles de l'azote, du phosphore et du soufre, la théorie de la formation des substances humiques, sont adjoints trois nouveaux sujets : biochimie de la décomposition des herbicides, la biodégradation des détergents, les enzymes dans le sol.

3. *Les relations microbes-sol.*

Cette partie plus restreinte que les deux autres traite des aspects microbiologiques et biochimiques de la rhizosphère.

Cet ouvrage présente un intérêt certain car sont regroupés sous le titre « Biochimie du sol » des sujets nouveaux comme les radicaux libres, la décomposition des herbicides, la biodégradation des détergents et des sujets habituels comme les cycles de l'azote, du phosphore et du soufre.

F. L.

Gaucher G. — Traité de pédologie agricole. Le sol et ses caractéristiques agronomiques. Paris, Dunod, 1968, 578 p.

Cet ouvrage est le premier d'une série de trois volumes devant constituer le « Traité de Pédologie agricole ».

La première partie constitue une introduction à l'ensemble du Traité par un historique de l'évolution des tendances de l'agrologie et de la pédologie dont la doctrine est également présentée. Les différentes caractéristiques et propriétés du sol sont étudiées dans la seconde partie. Dans la troisième, sont exposés les processus élémentaires de la pédogenèse pour aboutir à la description et à l'explication du profil pédologique.

L'auteur a rassemblé dans ce premier volume une documentation très large et importante dont l'exposé, développé, est orienté et émaillé par de nombreuses considérations personnelles découlant d'une longue expérience et donnant, de prime abord, un ton critique intéressant à l'ouvrage dans son ensemble. Mais cette impression ne se confirme pas toujours dans le détail. La discussion des conceptions et des résultats avancés est, malheureusement, parfois insuffisante pour réduire la confusion qui existe souvent dans certains aspects de la science du sol comme l'auteur le souligne et voudrait y porter remède.

Aussi ce traité est-il plus un document de travail et un instrument de réflexion utile et intéressant pour le pédologue et l'agronome confirmés qu'un manuel destiné à l'initiation efficace de débutants en pédologie ou de jeunes agronomes comme le souhaite l'auteur.

Les sujets traités dans les tomes suivants seront :

— les facteurs de la pédogenèse et l'étude des types de sol, dans le second ;

— la pédologie agricole proprement dite et la méthode de prospection pédologique, dans le troisième.

R. B.

KILMER (V. J.), YOUNTS (S. E.), BRADY (N. C.), ed. THE ROLE OF POTASSIUM IN AGRICULTURE. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM HELD AT MUSCLE SHOALS (Alabama), JUNE 18-19, 1968. — Madison (Wisc.), American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America, 1968, 509 p.

Cet ouvrage donne les comptes rendus d'un symposium qui s'est déroulé à Muscle Shoals en 1968 et qui était consacré au rôle du potassium en agriculture. Il présente 22 contributions dont les titres sont les suivants :

1. ADAMS (S. A.). Réserves en potassium dans le monde,

2. KAPUSTA (E. C.). Technologie des engrais potassiques,

3. TOUNG (R. D.). Préparation d'engrais à base de potassium.

4. ENGELSTAD (O. P.). Évaluation agronomique du polyphosphate de potassium et des pyrophosphates de potassium et de calcium comme sources de potassium.

5. RICH (C. I.). Minéralogie du potassium du sol.

6. JACKSON (W. A.), VOLK (R. J.). Rôle du potassium dans la photosynthèse et la respiration.

7. LIEBHARDT (W. C.). Effet du potassium sur le métabolisme des hydrates de carbone et la translocation.

8. TEEL (M. R.). Effet du potassium sur la teneur en acides organiques et en azote non protéique des tissus de plantes.

9. WILSON (R. H.), EVANS (H. J.). Effet du potassium et d'autres cations monovalents sur les enzymes.

10. WILDE (W. S.). Rôle du potassium en nutritions animale et humaine.

11. GOSS (R. L.). Effet du potassium sur la résistance aux maladies.

12. CUMMINGS (G. A.), WILCOX (G. E.). Effet du potassium sur la qualité des fruits et légumes.

13. THOMAS (G. W.), HIPP (B. W.). Facteurs agronomiques affectant l'assimilabilité du potassium.

14. BARBER (S. A.). Mécanisme de l'absorption du potassium par les plantes.

15. MENGEL (K.). Cations échangeables dans les racines et absorption potassique par la plante.

16. MUNSON (R. D.). Interaction du potassium et d'autres ions.

17. NELSON (W. L.). Facteurs dus à la plante, affectant l'assimilabilité du potassium et son absorption.

18. UEXKUELL (H. R. VON). Nutrition potassique des plantes tropicales.

19. BLASER (R. E.), KIMBROUGH (E. L.). Nutrition potassique des plantes fourragères.

20. PESEK (J.). Nutrition potassique du soja et du maïs.

21. KOO (R. C. J.). Nutrition potassique des arbres fruitiers.

22. LUCAS (R. E.), Nutrition potassique des plantes potagères.

GAUVIN (A.), GUERREE (H.). — ÉLÉMENTS D'HYDRAULIQUE. — 7e édition. Paris, Eyrolles, 1968, 232 p.

Cet ouvrage résulte de la refonte des « Notions d'hydraulique ».

L'effort de modernisation a porté notamment sur :

— Les écoulements sous pression, avec des formules modernes concernant le calcul des pertes de charge.

— Les machines hydrauliques, avec la description détaillée des divers types de turbo-pompes et de turbines hydrauliques.

L'ouvrage est complété par de nombreux tableaux, tables et abaques.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : DUPONT et DUVAL (1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés. et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc., doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les figures ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 20 1969 NUMÉRO 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149 rue de Grenelle, PARIS-7e

Ann. agron., 1969, **20** (2), III-143.

RÉSULTATS DE DOUZE ANNÉES D'OBSERVATIONS LYSIMÉTRIQUES A QUIMPER (1954-1965)

M. COPPENET

avec la collaboration technique de Madeleine HÉLIAS, Éliane SPAGNOL et L. LE CORRE

Station d'Agronomie,
Boulevard Kerguelen, 29 S-Quimper
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

L'installation lysimétrique de Quimper comporte huit cases de 2 m², contenant un sol granitique très riche en matière organique, de 90 cm d'épaisseur. Quatre cases sont cultivées et chaulées avec engrais phosphopotassiques mais sans engrais azotés. Deux cases sont cultivées sans engrais, deux autres sont maintenues sans végétation. Le présent mémoire donne les résultats enregistrés sur une période de douze ans : drainage par trimestre et par année, évaporation ou évapotranspiration par année, efficacité de l'eau évapotranspirée suivant les différentes conditions chimiques des sols. L'analyse chimique des eaux de drainage, effectuée trimestriellement, pour l'extrait sec, l'azote, l'acide phosphorique, la potasse, la chaux, la magnésie a permis de comparer les exportations d'éléments par drainage et par les récoltes dans le cas des lysimètres nus et dans le cas des lysimètres cultivés.

Nous donnons enfin, les modifications subies par la couche arable au cours de cette période en ce qui concerne les bases échangeables, le carbone et l'azote. A propos de chaque point important, référence est faite à d'autres installations lysimétriques françaises.

INTRODUCTION

L'installation de lysimètres au champ d'expérience de la Station d'Agronomie de Quimper a été effectuée en 1941, sous la direction de P. BOISCHOT, aujourd'hui Directeur honoraire du département « Agronomie » de l'I. N. R. A., qui écrivait à l'époque : « L'installation a été conçue dans le but de voir l'influence des engrais et de la chaux sur la quantité d'éléments exportés par drainage et l'influence d'une végétation avec ou sans engrais, avec ou sans chaux, sur cette même exportation. »

Bien entendu, ces cases lysimétriques permettent, en outre, l'étude du bilan hydrique, sous le climat océanique très accusé du Finistère, et l'analyse périodique d'un sol maintenu dans des conditions assez proches de celles qui règnent en plein champ.

De 1942 à 1948, l'expérimentation a été suivie par P. BOISCHOT, puis par Y. COÏC, Chef du département Physiologie végétale de l'I. N. R. A. Ce dernier ayant décelé des anomalies dans le fonctionnement, les observations ont été relâchées de 1948 à 1951, puis arrêtées définitivement. Les résultats obtenus au cours de cette première période n'ont donné lieu qu'à des comptes rendus partiels mais nous utiliserons dans

ce mémoire un certain nombre de chiffres extraits des cahiers d'expérience de J. HERVIAUX, ingénieur agronome, chargé de l'expérimentation.

La première période expérimentale a pris fin en 1951, puisque des fuites faussaient les volumes d'eau de drainage recueillis. Après réfection des enduits intérieurs et vérification de l'étanchéité, le chargement avec une nouvelle terre a été exécuté en septembre 1953, les eaux de drainage ont été recueillies à partir du 1er juin 1954 et analysées à partir du 1er juin 1955.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description de l'installation

Elle comprend huit compartiments en béton armé répartis en deux rangées de quatre avec deux tranchées latérales permettant la récolte des eaux de drainage (fig. 1). Dans l'épaisseur (12 cm) de la paroi séparant la terre en expérience de la tranchée, une couche de sciure de bois assure l'isolation thermique. Chaque case est carrée et mesure 1,41 m de côté pour une profondeur de 1 m, la partie

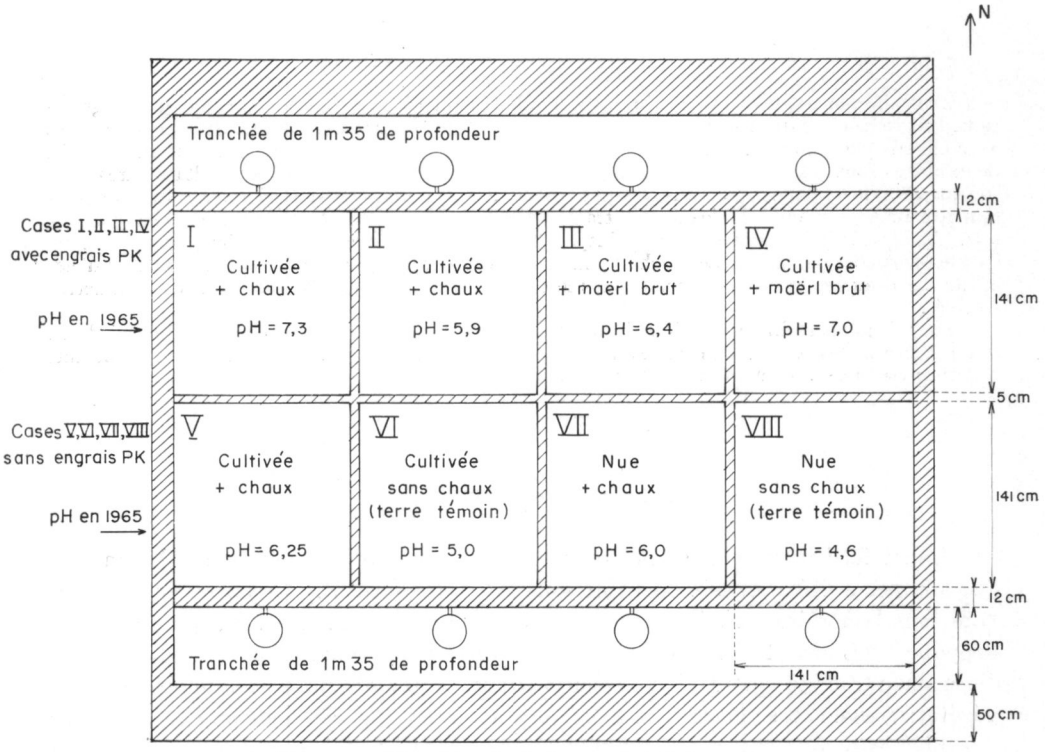


FIG. 1. — *Disposition des huit cases lysimétriques*

supérieure de la maçonnerie dépassant, suivant la pente du terrain, de quelques décimètres le niveau du sol environnant. Les précautions « d'environnement » n'ont guère été prises pour l'implantation de ces lysimètres qui se trouvent entourés par diverses parcelles portant diverses cultures. Si ces précautions sont impératives pour installer des évapotranspiromètres, il n'en est toutefois pas de même pour des lysimètres dont aucun n'est irrigué. La hauteur effective de terre contenue dans chacun des huit éléments était d'environ 0,90 m le jour du remplissage mais, avec le temps, un certain tassement s'est opéré. La profondeur meuble des sols bretons dépasse rarement 1,20 m mais se trouve souvent inférieure à 0,90 m.

Recueil des eaux de drainage

Chaque fois que le récipient, d'une contenance de 30 litres, dans lequel coule l'eau drainante, est plein, on en prélève le dixième que l'on met en attente dans le but de constituer l'échantillon moyen du trimestre.

En période sèche et après un arrêt de drainage, on prélève, bien entendu, la dixième partie d contenu sans attendre le plein du récipient.

L'analyse chimique des eaux est ainsi effectuée une fois par trimestre.

Remplissage et caractéristiques du sol mis en expérience

C'est dans une terre de culture abandonnée de la région quimpéroise et en situation de bas de pente qu'une fosse suffisamment vaste a été ouverte. Chaque couche de 10 cm d'épaisseur correspondant à la surface des huit cases était placée à part dans un tas, puis transportée par camion à proximité de l'installation. Après répartition égale de cette quantité dans chacune des cases, un tassement aussi régulier que possible était effectué en foulant au pied. Un échantillon par couche a, bien entendu, été mis de côté pour l'analyse.

Le support géologique de cette terre est un granite à gros grains, à mica blanc dominant, nommé « granulite » dans les cartes géologiques. La composition chimique de l'horizon 0-20 cm est la suivante pour les éléments totaux [1] :

SiO_2	64,25 p. 100
Al_2O_3	13,90
Fe_2O_3	3,60
K_2O	3,50
Na_2O	0,80
CaO	0,37
MgO	0,20
Perte au feu	13,40
	100,02

Les teneurs en silice et alumine sont importantes, comme cela est toujours le cas pour les granites, alors que les teneurs en fer, potasse et chaux sont particulièrement faibles.

Voici à présent l'analyse granulométrique et agronomique du profil entier par couches de 20 cm d'épaisseur :

pour mille de terre fine et sèche

Profondeur	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Azote total	4,28	3,80	2,50	1,30	0,90
P_2O_5 citrique	0,050	0,045	0,040	0,025	0,025
K_2O échangeable	0,200	0,165	0,090	0,080	0,080
CaO échangeable	0,500	0,400	0,250	0,180	0,120
MgO échangeable	0,080	0,045	0,025	0,012	< 0,005
pH (H_2O)	4,90	4,80	4,80	4,85	4,90
Terre fine % de terre brute	75	76	80	78	77
Humidité équivalente *	265	274	245	231	218
Argile	176	172	217	199	188
Limon fin	182	188	192	210	234
Limon grossier	111	114	118	138	153
Sable fin	87	77	75	85	108
Sable grossier	296	291	278	310	338

* Méthode par centrifugation.

[1] Analyse due à l'obligeance de G. PEDRO, maître de recherches à l'I. N. R. A., au Laboratoire des Sols de Versailles.

Tout le profil est donc caractérisé par une forte richesse en azote total donc en matières organiques. La teneur en argile et en limon fin est élevée pour un sol granitique, la proportion de sable grossier est très forte comme cela est habituel pour une terre de ce type, mais au point de vue chimique, les bases échangeables (Ca en particulier) sont si peu abondantes que le pH reste inférieur à 5,0. La déficience phosphorique est accusée alors que le niveau de potassium échangeable est relativement bon.

L'expérience a montré une très grande perméabilité pour l'eau des précipitations, ceci grâce à une texture que l'on peut qualifier de « sablo-limoneuse humifère » et aussi, grâce à la forte proportion de refus au tamis de 2 mm.

Protocole expérimental

La figure 1 indique la disposition des traitements mais voici, en résumé, la correspondance entre le numéro de chaque lysimètre, les engrais et amendements apportés ainsi que le pH de la couche arable en 1965 :

Case	I	avec engrais PK	+ chaux	pH = 7,3	cases cultivées
Case	II	—	+ chaux (faible dose)	pH = 5,9	
Case	III	—	+ maërl brut (simple dose)	pH = 6,4	
Case	IV	—	+ maërl brut (double dose)	pH = 7,0	
Case	V	sans engrais PK	+ chaux	pH = 6,25	
Case	VI	—	sans chaux	pH = 5,0	
Case	VII	—	+ chaux	pH = 6,0	cases nues
Case	VIII	—	sans chaux	pH = 4,6	

Amendements calcaires.

Ils ont été enfouis, à la bêche, en janvier 1954, avec les premières doses d'engrais pour la première culture : une avoine semée le 24 mars 1954.

Case I : équivalent de 14,6 tonnes CaO/ha sous forme de chaux éteinte (52,5 p. 100 CaO + 3,2 p. 100 MgO) en deux moitiés, la seconde dose en 1958. En 1958, le pH de la couche arable est de 6,0 mais la nouvelle dose de chaux le porte à 7,2-7,3 dès l'année 1961.

Case II : équivalent de 2,4 tonnes CaO/ha (soit 1/6 de la dose précédente) sous forme de la même chaux éteinte. Son pH, de 5,5 en 1956, est monté au voisinage de 6,0 dès 1961 (influence des apports de scories Thomas).

Case III : 7,3 tonnes CaO/ha sous forme de maërl brut (46,5 p. 100 CaO + 4,5 p. 100 MgO). Le maërl a une solubilité carbonique presque nulle et un refus pratiquement total au tamis de 1 mm. — pH du sol, 5,8 en 1956 mais voisin de 6,5 dès 1961.

Case IV : double dose de maërl (14,6 tonnes CaO/ha) — pH du sol 5,8 en 1956, 6,0 en 1958 et voisin de 7,0 en 1961.

Case V : 7,3 tonnes CaO/ha sous forme de chaux éteinte, pH 5,8 en 1958, pH 6,5 en 1961.

Case VI : pas d'amendement calcaire.

Case VII : même dose de chaux éteinte que la case V.

Case VIII : pas d'amendement calcaire.

Il convient de remarquer que les cases I, II, III et IV ont reçu, en plus des amendements calcaires et en 7 fois au cours de la période 1954-1965, l'équivalent de 5 tonnes/ha de scories Thomas apportant une quantité non négligeable de chaux.

Engrais phosphatés.

Au cours des 8 premières années, 180 unités de P_2O_5 chaque année, puis 60 unités par la suite, tantôt sous forme de scories, tantôt sous forme de superphosphate.

Engrais potassiques.

Constitués uniquement par du chlorure de potassium à une dose variable avec les cultures mais correspondant à une moyenne de 140 unités par an.

Engrais azotés.

Il n'a jamais été appliqué d'engrais azotés au cours de ces douze années. Au moment de la mise en place du dispositif expérimental, les engrais azotés ont été proscrits en vue d'étudier la minéralisation de la matière organique dans les meilleures conditions possibles. Depuis l'année 1966, ils sont utilisés à dose égale dans tous les lysimètres.

Les modifications subies par la couche arable (0-20 cm) au cours des douze années d'expérimentation apparaissent clairement à la lecture du tableau ci-dessous donnant les résultats analytiques en 1965 :

	pH	p. 1 000 de terre fine			
		P_2O_5 citrique	K_2O échangeable	CaO échangeable	MgO échangeable
Case I	7,3	0,256	0,295	5,600	0,037
Case II	5,9	0,315	0,341	2,200	0,025
Case III	6,4	0,287	0,326	3,200	0,094
Case IV	6,9	0,320	0,301	4,500	0,145
Case V	6,25	0,050	0,084	2,600	0,054
Case VI	5,0	0,050	0,109	0,460	0,005
Case VII	6,00	0,072	0,132	2,520	0,050
Case VIII	4,6	0,088	0,120	0,230	< 0,005

La teneur en acide phosphorique citrique, extrêmement faible au départ, est devenue très bonne après huit ans d'expérience environ dans les quatre cases à engrais. On s'efforcera de la maintenir à ce niveau dans l'avenir. La teneur en potasse est très bonne dans les cases à engrais mais l'épuisement par les récoltes et par le drainage est très sensible dans les cases sans engrais (case V et case VIII)

Les teneurs en chaux échangeable sont en étroite relation avec les pH, le seul drainage expliquant, pour la case VIII, la chute importante de CaO échangeable. Les cases à maërl (III et IV) voient leur teneur en magnésie échangeable s'accroître par suite de la lente dissolution des particules alors que partout ailleurs elle diminue et ceci dans la case VIII nue et acide.

Les cultures.

Leur succession est donnée au tableau 1 avec les rendements en matière sèche concernant la case I, la plus fortement chaulée et ayant fourni les meilleures productions.

I. — BILAN HYDRIQUE

Résultats et discussion

La mesure des volumes d'eau drainés trimestriellement par case de 2 m² de surface nous permet de calculer le drainage annuel en millimètres, d'où nous pourrons déduire l'évaporation ou l'évapotranspiration suivant qu'il s'agit d'un lysimètre nu ou d'un lysimètre cultivé :

Pluie — Drainage = Évaporation ou Évapotranspiration

Un pluviomètre type « Association » fonctionne à 20 mètres de l'installation ainsi qu'un thermomètre enregistreur et un héliographe de Campbell ; ces deux derniers appareils permettant le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la formule de Turc (Turc, 1961).

a) *Pluviométrie*

Sous le climat océanique très accusé de Quimper, situé à la pointe du Finistère mais cependant à 15 kilomètres à l'intérieur des terres, le trimestre le plus pluvieux est le trimestre d'hiver : du 1er décembre au 1er mars (400 mm en moyenne). Nous

TABLEAU I

Rendement des cultures de la case I et évapotranspiration pendant les périodes de répercussion de la culture

Année	Cultures	Période de répercussion de la culture (1)	Production de MS en t/ha Case I (2)	Évaporation en mm (3)		Différence $E_c - E_n$ en mm ou $D_n - D_c$	Supplément d'eau évaporée par la culture en l/kg de MS	Quantité d'eau nécessaire à la formation d'1 kg MS (litres)	Kg de MS produits par mm d'eau et par ha (kg)
				E_c Case cultivée I	E_n Case nue VII				
1954	Avoine	15 avril-2 novembre	6,25	375,7	272,5	103,2	165,0	601,9	16,7
1955	Pomme de terre	4 juin-18 décembre	8,87	260,3	211,8	48,5	54,6	292,2	34,1
1956	Blé de printemps	5 juin-20 novembre	6,97	403,9	349,4	54,5	78,1	579,4	17,2
1957	Orge	15 avril-12 décembre	6,99	498,2	481,5	116,7	166,9	712,7	14,0
1958	Betterave	3 juillet-17 novembre	7,65	346,2	241,3	104,9	137,1	452,6	22,1
1959	Blé d'hiver	5 février-10 octobre	3,40	179,5	156,2	23,3	68,5	527,9	18,9
1960	Ray-grass		8,39						
1961	Pomme de terre	13 juin-27 novembre	8,1	322,3	270,1	52,2	64,4	397,5	25,1
1962	Orge de printemps	1er mars-4 novembre	5,17	481,6	435,8	45,8	88,5	931,5	10,7
1963	Ray-grass		4,47						
1964	Ray-grass								
1965	Blé d'hiver	2 avril-12-novembre	7,58	508,0	431,0	77,0	101,5	670,1	14,9
	Moyennes (9 cultures) ray-grass non compris ..		6,77	375,0	305,5	69,5	102,9	573,9	19,3

(1) Période pendant laquelle le drainage de la case cultivée est inférieur à celui de la case nue ; elle débute après les semis ou plantations et se prolonge jusque après les récoltes.

(2) Cette matière sèche comprend suivant les cas : grain + paille, tubercules + fanes, racines + feuilles et collets.

(3) Soit pluie — drainage de la période considérée.

TABLEAU 2

Quimper. Pluviométrie (période 1954-1965)

Pluviométrie en mm par trimestre	1954	1955	1956	1957	1958	1959	
1-3 — 1-6 (printemps)	161,5	156,3	123,0	136,6	243,5	263,5	
1-6 — 1-9 (été)	238,4	77,3	220,0	161,1	365,2	83,7	
1-9 — 1-12 (automne)	374,6	165,0	277,4	235,8	217,2	385,6	
1-12 — 1-3 (hiver)	458,3	386,3	618,9	340,3	321,3	504,9	
Total annuel	1 232,8	784,9	1 239,3	873,8	1 147,5	1 237,7	
	1960	1961	1962	1963	1964	1965	Moyennes
1-3 — 1-6 (printemps)	210,9	187,0	227,1	222,0	301,4	206,0	*203,2*
1-6 — 1-9 (été)	316,3	108,4	97,8	150,6	110,7	204,4	*177,8*
1-9 — 1-12 (automne)	532,1	329,0	309,7	390,7	206,0	312,6	*311,2*
1-12 — 1-3 (hiver)	428,3	378,7	263,8	176,3	322,4	560,4	*396,6*
Total annuel	1 487,6	1 003,1	898,4	938,9	940,5	1 283,4	**1 088,9**

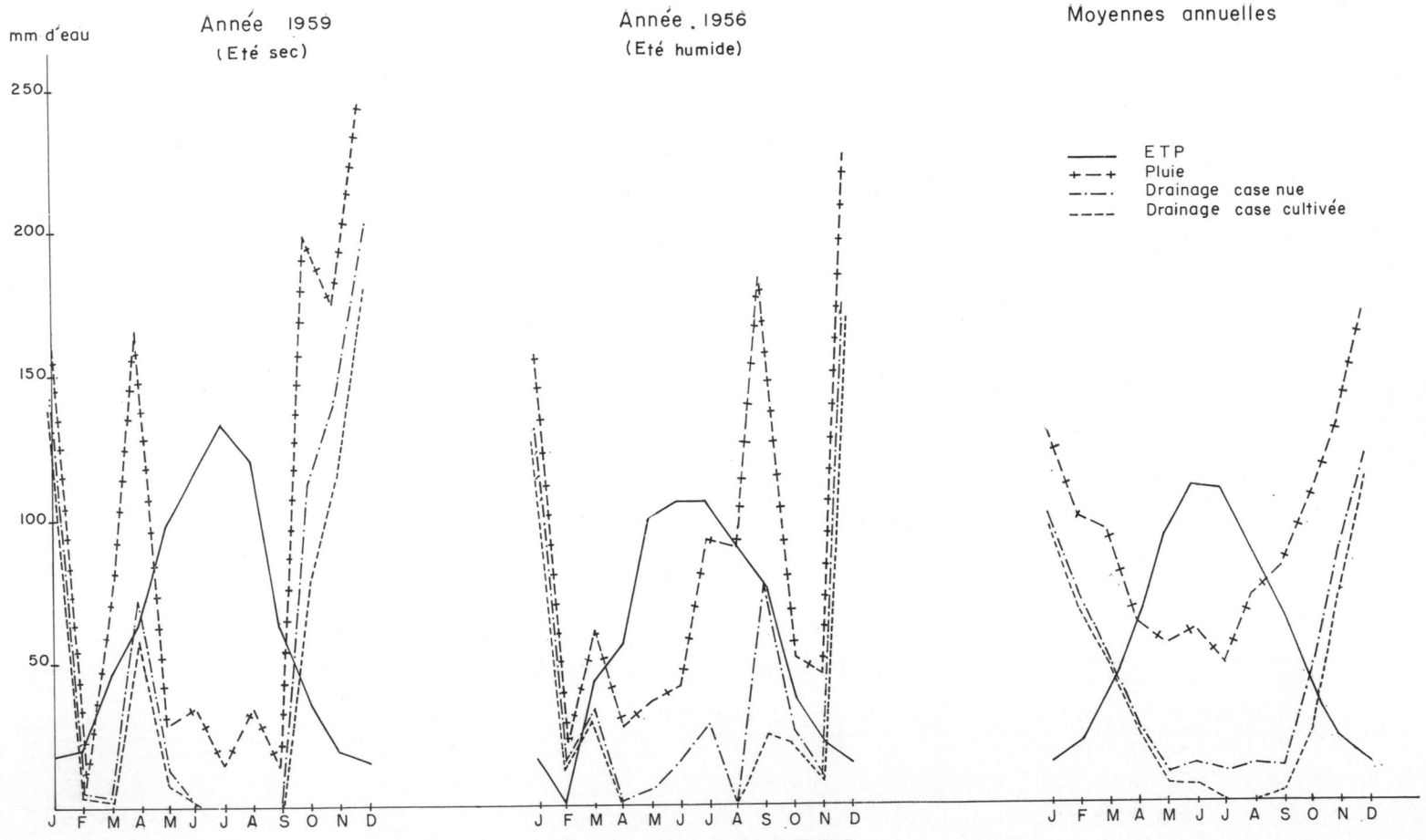


FIG. 2. — *Pluie. Drainage. E. T. P.*

avons, en effet, rédigé les tableaux et effectué les calculs sur la base de l'année lysimétrique qui commence le 1er mars. Le choix du 1er mars a été fait par BASTISSE à Versailles, c'est pourquoi nous l'avons adopté ; nos périodes de drainage coïncident d'ailleurs sensiblement. Théoriquement, il faut choisir une époque où la relation $P = E + D + \Delta H$ soit vérifiée avec un ΔH aussi constant que possible. En d'autres termes, nous pourrions prendre une autre date entre décembre et mars puisque nous aurions des chances d'y retrouver une même humidité du sol. On peut estimer que dans ces conditions, ΔH est proche de zéro, ce qui permet d'évaluer E puisque P et D sont mesurés. Pour les bilans globaux hydriques et chimiques, ce choix a finalement peu d'importance lorsque nous considérons un ensemble de plusieurs années. Dans le tableau 2, la pluviométrie est donnée par trimestre pour les 12 années d'expérimentation. Le trimestre d'automne (1er septembre-1er décembre) est également très pluvieux : environ 300 mm. La figure 2 indique la répartition mensuelle des pluies pour la moyenne des douze ans et pour les années 1956 et 1959. Au cours de la période 1954-1965, la hauteur moyenne des précipitations est la plus forte en décembre avec 166 mm, la plus faible en juillet avec 47 mm ; si la moyenne pluviométrique est de 1 088 mm, les écarts enregistrés sont 784 mm en 1955 et 1 487 mm en 1960.

b) *Drainage*

Le tableau 3 donne, pour les 8 lysimètres et pour les 12 années, la quantité d'eau drainée chaque trimestre en millimètres. Il résume également, par année, la différence pluie-drainage ainsi que le pourcentage drainé par rapport aux précipitations.

Le trimestre d'hiver (1er décembre-1er mars) fournira, à plus forte raison, le plus d'eau drainante : 290 mm environ contre 100 mm au trimestre d'automne pour un total annuel de 490 mm et ceci dans le cas des cases avec végétation.

Le trimestre d'été (1er juin-1er septembre) ne fournit pas d'eau drainante 9 années sur 12. Seule l'année 1958 a eu, en fait, un été suffisamment pluvieux pour provoquer un drainage important.

Pour les cases maintenues sans végétation, l'absence de drainage d'été ne se produit que 5 fois sur 12 ; l'arrêt de la percolation dure alors de 2 à 4 mois tandis que dans le cas des cases cultivées, elle peut durer de 3 à 6 mois (consulter la fig. 2).

Si le drainage total annuel moyen est de *485 mm* pour les lysimètres cultivés (écarts 238 et 714 mm) il est de *563 mm* pour les lysimètres non cultivés. Le pourcentage drainé par rapport aux précipitations est de 43 p. 100 dans le premier cas et de 50 p. 100 dans le second.

Régressions pluie-drainage et pluie-évaporation.

Le calcul donne les équations suivantes :

$$\text{Case nue VII} \begin{cases} D = 0{,}796\ P - 299 & \text{HS (fig. 3)} \\ E = 0{,}190\ P + 315 & \text{NS} \end{cases}$$

$$\text{Case cultivée I} \begin{cases} D = 0{,}702\ P - 294 & \text{HS (fig. 4)} \\ E = 0{,}277\ P + 308 & \text{S} \end{cases}$$

On voit que la régression pluie-drainage est très étroite tandis que la régression pluie-évaporation est non significative pour la case nue. Ceci signifie que sous le

TABLEAU 3. — *Drainage* (Période 1954-1965)

Drainage en mm	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	Moyennes
Case I. — Cultivée													
1-3 — 1-6	98,5	63,7	32,5	33,5	93,0	63,7	114,0	68,7	22,7	155,7	144,5	78,0	*80,7*
1-6 — 1-9		12,0			102,7								*9,5*
1-9 — 1-12	166,7		66,0		57,0	189,7	306,2	68,0	83,0	182,0		93,5	*101,0*
1-12 — 1-3	358,7	246,2	465,7	207,5	236,7	359,5	294,5	241,5	132,7	124,5	271,5	519,2	*287,9*
Drainage annuel	**623,9**	**321,9**	**564,2**	**241,0**	**489,4**	**612,9**	**714,7**	**378,2**	**238,4**	**462,2**	**416,0**	**690,7**	**479,4**
Évapotranspiration	608,9	463,0	675,1	632,8	658,1	624,8	772,9	624,9	660,0	476,7	524,5	592,7	609,5
P. 100 drainé	50,6	41,0	45,5	27,5	42,6	49,5	48,0	37,7	26,5	49,2	44,2	53,8	43,0
Case II. — Cultivée													
1-3 — 1-6	101,2	62,5	33,2	34,0	93,0	65,5	115,5	75,5	22,7	155,7	149,5	78,0	*82,1*
1-6 — 1-9		11,2			125,2		27,5						*13,6*
1-9 — 1-12	177,5		67,5		58,0	181,0	311,7	69,0	93,7	183,0		93,5	*102,9*
1-12 — 1-3	361,0	251,7	476,7	211,5	238,7	364,0	295,7	244,7	132,7	124,5	271,5	520,7	*291,1*
Drainage annuel	**639,7**	**325,4**	**577,4**	**245,5**	**514,9**	**610,5**	**750,4**	**389,2**	**249,1**	**463,2**	**421,0**	**692,2**	**489,8**
Évapotranspiration	593,1	459,5	661,9	628,3	632,6	627,2	737,2	613,9	649,3	475,7	519,5	591,2	599,1
P. 100 drainé	51,8	41,4	46,5	28,0	44,8	49,3	50,4	38,7	27,7	49,3	44,7	53,9	43,8
Case III. — Cultivée													
1-3 — 1-6	105,7	62,7	33,2	33,5	94,0	66,2	115,5	75,5	22,7	155,7	145,5	78,0	*82,3*
1-6 — 1-9		11,2			124,7		27,7						*13,6*
1-9 — 1-12	179,2		70,7		58,5	191,2	312,0	68,2	85,0	181,5		93,5	*103,3*
1-12 — 1-3	362,7	259,0	480,7	211,2	238,7	364,0	294,5	245,0	132,7	124,5	271,5	522,0	*291,2*
Drainage annuel	**647,6**	**332,9**	**584,6**	**244,7**	**515,9**	**621,4**	**749,7**	**388,7**	**240,4**	**461,7**	**417,0**	**693,5**	**491,5**
Évapotranspiration	585,2	452,0	654,7	629,1	631,6	616,3	737,9	614,4	658,0	477,2	523,5	589,9	597,4
P. 100 drainé	52,5	42,4	47,1	28,0	44,9	50,2	50,3	38,7	26,7	49,1	44,3	54,0	44,0
Case IV. — Cultivée													
1-3 — 1-6	102,2	62,5	32,5	33,2	94,0	66,2	115,0	74,2	22,7	155,7	144,0	78,0	*81,6*
1-6 — 1-9		6,5			103,0								*9,1*
1-9 — 1-12	167,0		68,2		59,2	191,0	305,7	67,2	85,0	180,5		95,0	*101,5*
1-12 — 1-3	338,0	252,2	476,2	211,7	238,7	364,0	294,2	244,7	132,7	125,0	271,5	521,2	*289,0*
Drainage annuel	**607,2**	**321,2**	**576,9**	**244,9**	**494,9**	**621,2**	**714,9**	**386,1**	**240,4**	**461,2**	**415,5**	**694,2**	**481,5**
Évapotranspiration	625,6	463,7	662,2	628,9	652,6	616,5	772,7	617,0	658,0	477,7	525,9	589,2	607,4
P. 100 drainé	49,2	40,9	46,5	28,0	43,1	50,1	48,0	38,4	26,7	49,1	44,1	54,0	43,1

TABLEAU 3. — *(suite).*

Drainage en mm	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	Moyennes
Case V. — Cultivée sans engrais													
1-3 — 1-6	96,7	63,2	31,5	33,5	93,2	82,0	125,7	70,5	24,2	150,7	148,5	78,0	*83,1*
1-6 — 1-9		21,7			131,0		16,5						*14,1*
1-9 — 1-12	182,5		64,5	1,7	91,7	224,5	314,5	84,5	88,5	183,5		123,0	*113,2*
1-12 — 1-3	359,7	244,2	491,2	219,7	239,7	370,2	294,5	234,0	132,2	127,5	265,0	520,0	*291,4*
Drainage annuel	**638,9**	**329,1**	**587,2**	**254,9**	**555,6**	**676,7**	**751,2**	**389,0**	**244,9**	**461,7**	**413,5**	**721,0**	**501,9**
Évapotranspiration	593,9	455,8	652,1	618,9	591,9	561,0	736,4	614,1	653,5	477,2	527,0	562,4	587,0
P. 100 drainé	51,8	41,9	47,3	29,1	48,4	54,6	50,4	38,7	27,2	49,1	43,9	56,1	44,8
Case VI. — Cultivée sans engrais ni chaux													
1-3 — 1-6	101,5	64,5	33,7	34,5	94,5	82,7	128,2	75,5	24,5	155,2	148,7	78,0	*85,1*
1-6 — 1-9	11,0	24,5			149,2		25,7						*17,5*
1-9 — 1-12	213,7	4,0	89,7	9,7	113,0	218,2	317,7	86,7	97,0	189,0		123,7	*121,8*
1-12 — 1-3	366,7	262,2	492,5	236,7	239,0	376,0	296,2	247,2	133,2	130,5	265,0	521,7	*297,2*
Drainage annuel	**692,9**	**355,2**	**615,9**	**280,9**	**595,7**	**676,9**	**767,8**	**409,4**	**254,7**	**474,7**	**413,7**	**723,4**	**521,7**
Évapotranspiration	539,9	429,7	623,4	592,9	551,8	560,8	719,8	593,7	643,7	464,2	526,8	560,0	567,2
P. 100 drainé	56,2	45,2	49,6	32,1	51,9	54,6	51,6	40,8	28,3	50,5	43,9	56,3	46,7
Case VII. — Nue, chaulée													
1-3 — 1-6	101,5	66,0	37,2	36,5	98,7	86,0	135,7	67,5	44,0	155,7	150,2	79,5	*88,2*
1-6 — 1-9	58,2	29,2	41,5		160,2		56,7	7,5				43,5	*33,0*
1-9 — 1-12	220,0	19,0	120,2	91,0	121,0	248,7	322,0	112,7	109,0	223,5	27,0	148,7	*146,9*
1-12 — 1-3	365,5	267,2	499,5	249,0	223,5	384,7	299,0	249,5	133,2	131,0	265,0	522,7	*299,0*
Drainage annuel	**745,2**	**381,4**	**698,4**	**376,5**	**603,4**	**719,4**	**813,4**	**437,2**	**286,2**	**510,2**	**442,2**	**794,4**	**567,3**
Évaporation	487,6	403,5	540,9	497,3	544,1	518,3	674,2	565,9	612,2	428,7	498,3	489,0	521,6
P. 100 drainé	60,4	48,5	56,3	43,0	52,5	58,1	54,6	43,5	31,8	54,3	47,0	61,8	50,9
Case VIII. — Nue sans chaux													
1-3 — 1-6	100,0	63,7	35,2	36,5	94,0	85,0	135,2	66,7	43,2	155,7	141,2	79,5	*86,3*
1-6 — 1-9	55,5	28,0	36,2		155,7		66,0	3,5				7,5	*29,3*
1-9 — 1-12	220,0	17,7	118,2	90,5	117,7	248,7	322,5	114,2	108,2	224,5	27,0	122,5	*144,3*
1-12 — 1-3	366,5	266,7	495,5	249,7	239,2	385,0	297,7	245,7	133,2	131,2	265,0	524,5	*299,9*
Drainage annuel	**742,0**	**376,1**	**685,1**	**376,7**	**606,6**	**718,7**	**821,4**	**430,1**	**284,6**	**511,4**	**433,2**	**734,0**	**559,9**
Évaporation	490,8	408,8	554,2	497,1	540,9	519,0	666,2	573,0	613,8	427,5	507,3	549,4	529,0
P. 100 drainé	60,1	47,9	55,2	43,1	52,8	58,0	55,2	42,8	31,6	54,4	46,0	57,1	50,3

climat de Quimper, l'évaporation du sol nu est pratiquement portée à son maximum et que tout excès de précipitation sera drainé. Sur un graphique donnant, pour chaque isotherme (ici 11, 4° de température moyenne annuelle), l'évaporation en fonction de la pluviométrie, l'intervalle 700-1 500 mm se trouve pratiquement sur le palier (L. TURC, *Ann. agron.* 1954, 4, p. 566). Le travail de thèse de TURC, cité ici, s'applique au bassin versant d'un cours d'eau mais la droite représentant l'évaporation en fonction de la pluviométrie passe entre celle correspondant à la case nue et celle correspondant à la case cultivée.

En portant sur des graphiques l'évaporation annuelle en fonction de la pluviométrie de chacun des trimestres, on s'aperçoit qu'il n'existe de relation qu'entre E ou E. T. R. annuels et la pluviométrie du trimestre d'été, mais le calcul de la régression a montré que cette corrélation n'est pas significative.

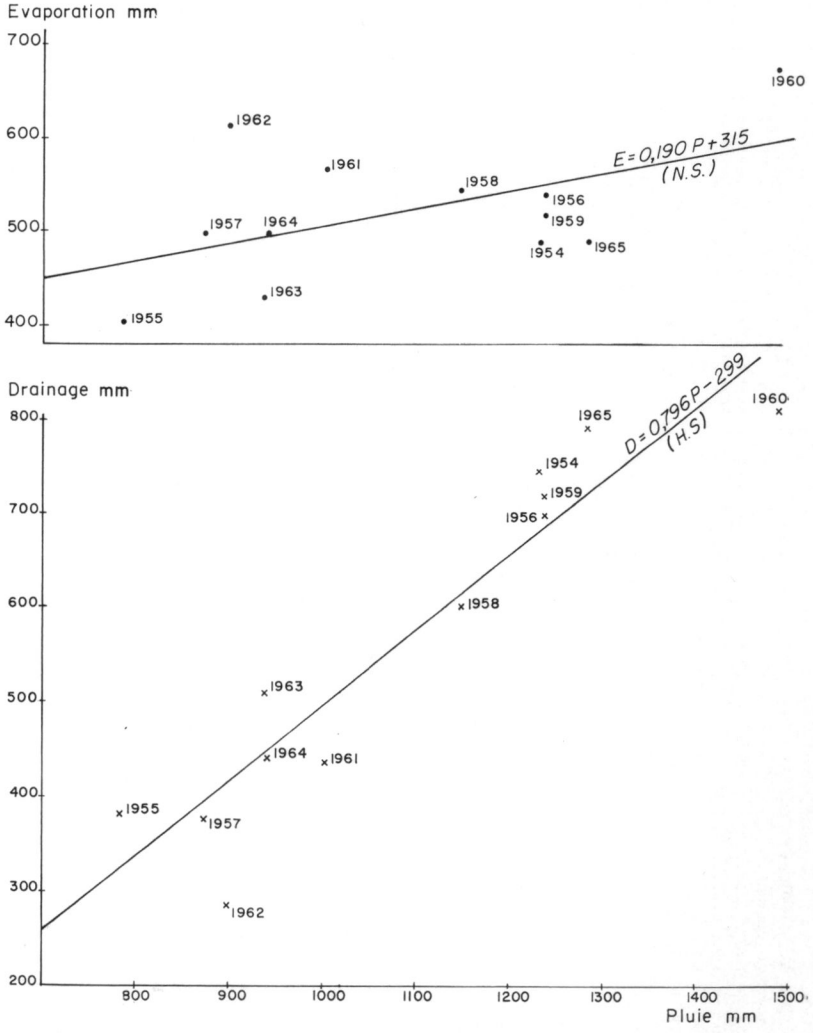


FIG. 3. — *Case VII nue: régressions pluie/drainage et pluie/évaporation*

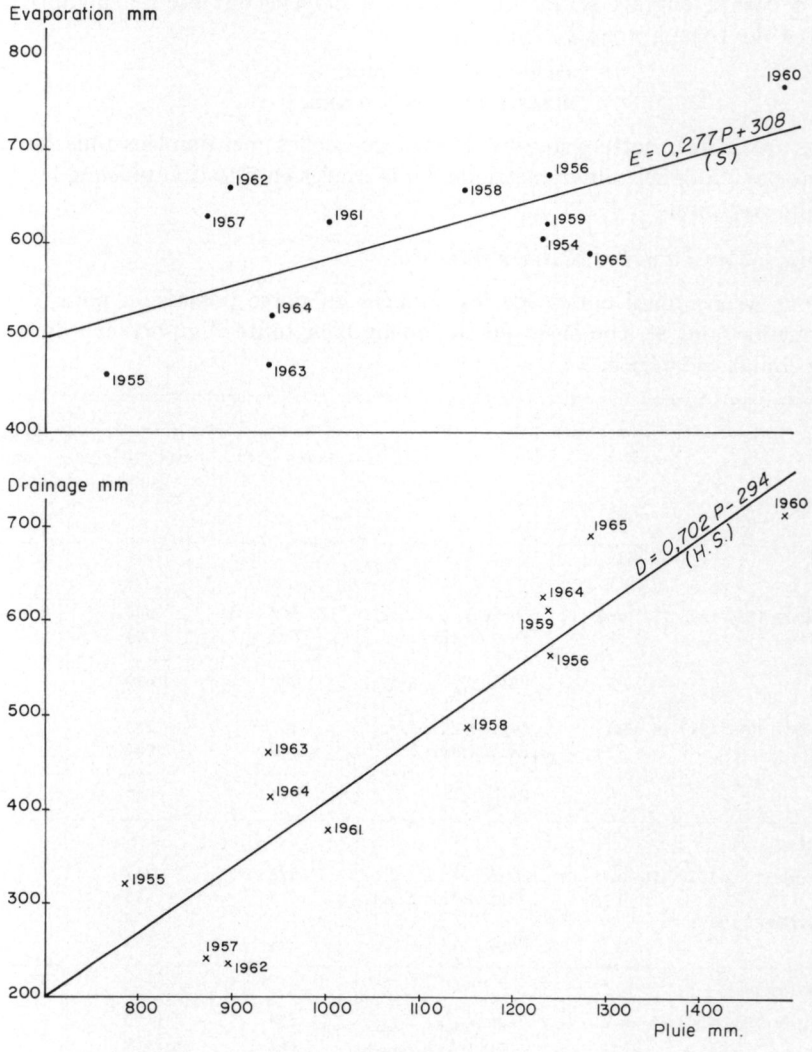


FIG. 4. — *Case I cultivée: régressions pluie/drainage et pluie/évaporation*

Première période expérimentale 1942-1948.

Au cours de cette première période, l'installation contenait la terre du champ d'expérience lui-même, soit une terre granitique en bon état de culture, de pH = 6,5, riche en éléments fertilisants, beaucoup moins humifère que la terre actuelle (azote = 2,2 p. 1 000). Les deux granulométries sont, par contre, très voisines l'une de l'autre. Nous n'entrerons pas dans le détail du protocole expérimental, nous noterons toutefois qu'il existait 4 cases nues et 4 cases cultivées avec dans chaque groupe : 1 témoin, 1 case à chaux + engrais NPK, 1 case à carbonate de chaux + engrais

NPK, 1 case à engrais NPK. Les drainages moyens ont été les suivants pour les 6 années de 1942 à 1947 :

cases nues 467 mm,
cases cultivées 280 mm.

Ces quantités, nettement plus faibles que celles mentionnées plus haut, s'expliquent par un déficit pluviométrique des 6 années en question puisque la moyenne n'est que 947 mm.

Comparaison avec d'autres Stations françaises.

Nous avons réuni ci-dessous les données en notre possession pour Versailles, Clermont-Ferrand et Toulouse qui indiquent bien toute l'importance du drainage sous le climat finistérien.

		Cases nues (mm)	Cases cultivées (mm)	Production annuelle moyenne de MS (t/ha)
Quimper				
Période 1954-1965 (12 ans)	*Drainage*	*563*	*485*	6,15
	Évaporation	*526*	604	
	Pluie	1 089	1 089	
Période 1942-1947 (6 ans)	*Drainage*	*467*	*280*	7,8
	Évaporation	*480*	667	
	Pluie	947	947	
Versailles				
Période 1933-1949 (16 ans)	*Drainage*	*217*	*152*	5,9
	Évaporation	*378*	443	
(BASTISSE, 1953)	Pluie	595	595	
Clermont-Ferrand				
Période 1954-1963 (9 ans)	*Drainage*	*210*	72	8,3
	Évaporation	*361*	499	
(COLLIER, 1964)	Pluie	571	571	
Toulouse				
Période 1949-1961 (12 ans)	*Drainage*	*283*		
	Évaporation	400		
(GADET et SOUBIES, 1962)	Pluie	683		

c) *Évaporation et évapotranspiration*

Le tableau 3 indique, par année, pour chaque lysimètre, la différence pluie — drainage soit l'évaporation des lysimètres maintenus sans culture ou l'évapotranspiration réelle (E.T.R.) des lysimètres cultivés.

Comparaison avec l'évapotranspiration potentielle (E.T.P.)

Nous avons calculé mensuellement, pendant les 12 années, et d'après nos enregistrements météorologiques, l'E.T.P. selon TURC grâce à l'utilisation des abaques.

Voici, mises en parallèle, cette E. T. P. et l'E. T. R. de la case I qui a donné les meilleures récoltes :

	E. T. R. (mm)	E. T. P. (mm)		E. T. R. (mm)	E. T. P. (mm)
1954	608,9	669,4	1960	772,9	679,6
1955	463,0	685,3	1961	624,9	696,7
1956	675,1	682,8	1962	660,0	665,5
1957	632,8	648,0	1963	476,7	646,6
1958	658,1	615,9	1964	524,5	660,2
1959	624,8	749,5	1965	592,7	637,5

	E. T. R.	E. T. P.
Moyenne	609,5 mm	667,6 mm

L'E. T. P. (TURC) est toujours supérieure à l'E. T. R., sauf pour deux années (1958 et 1960), alors qu'en moyenne elle dépasse E. T. R. de 60 mm environ. Les années 1958 et 1960 sont les années où les pluies estivales ont été les plus abondantes. On peut penser que la formule de TURC donne des valeurs un peu faibles mais d'autre part, il est possible qu'un environnement desséchant (allées) exagère l'E. T. R. des lysimères qui deviendrait ainsi supérieure à celle d'un champ. Ajoutons que, d'après les cartes de l'E. T. P. moyenne mensuelle établies par TURC, on relève pour Quimper une valeur annuelle de 695 mm.

d) *Efficacité de l'eau évapotranspirée suivant les différentes conditions chimiques de sol*

Évapotranspiration annuelle totale.

Nous basant sur les moyennes des douze années de l'expérimentation, voici, mises en regard, les évaporations de 5 lysimètres et les quantités de matière sèche produites :

	P—D (m/m)	Matière sèche produite en t/ha
Case nue VII. — pH = 6,0	521	0
Case cultivée VI. — pH = 5,0 (sans engrais PK).....	567	2,11
— V. — pH = 6,25 (sans engrais PK).....	587	3,36
— II. — pH = 5,9 (avec engrais PK)	600	5,55
— I. — pH = 7,3 (avec engrais PK)	610	6,15

Ces chiffres, portés sur un graphique, comme proposé par ROBELIN (1966), permettent de voir l'allure de la courbe de la production de matière végétale en fonction de l'eau évapotranspirée. On peut également situer E. T. P. (TURC) par rapport aux E. T. R. mesurées mais, rappelons que l'E. T. R. de la case I est encore inférieure à

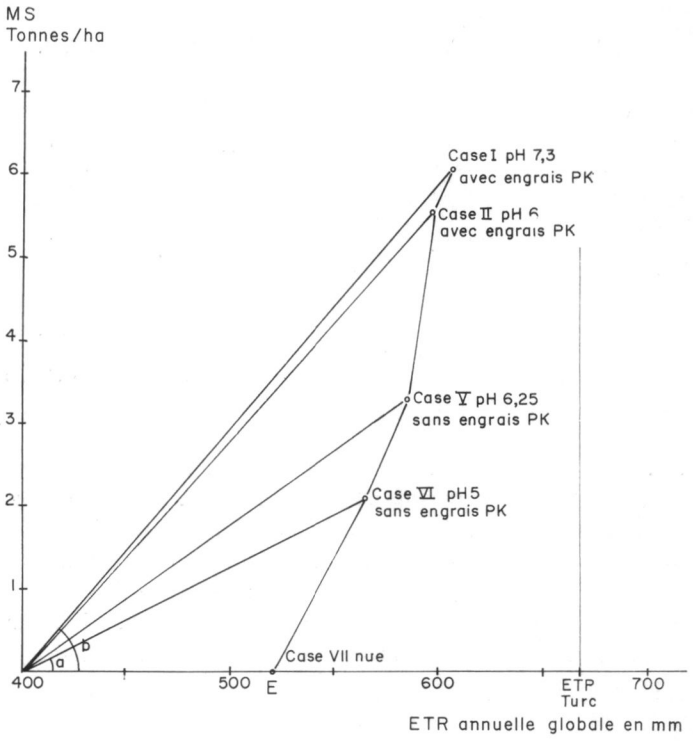


FIG. 5. — *Relation entre E. T. R. annuelle totale et la production de matière sèche suivant les conditions chimiques*

l'E. T. M. puisqu'on n'a pas apporté d'engrais azotés. L'efficacité de l'eau est accrue dans de notables proportions entre la case VI acide et sans engrais (angle *a*) et la case I bien chaulée et avec engrais PK (angle *b*) (fig. 5).

Évapotranspiration limitée à la période de répercussion de la culture.

Cette période de répercussion correspond à la période de l'année pendant laquelle le drainage des sols cultivés est inférieur au drainage des sols non cultivés. Pendant l'hiver, tous les lysimètres drainent sensiblement la même quantité d'eau. Comme le drainage n'est pas journalier, les périodes d'arrêt ou de reprise de drainage ne correspondent pas aux périodes d'influence de la culture comme indiqué pour chaque année dans le tableau 1.

Pour 7 années où les périodes de différenciation des drainages sont nettes, voici la moyenne des E. T. R. avec la moyenne de la matière sèche produite annuellement :

	E. T. R. (mm)	Matière sèche produite en t/ha
Case VI	378	2,81
Case V	393	4,82
Case II	405	6,73
Case I	407	7,13

L'influence des conditions chimiques du sol sur l'économie de l'eau est bien mise en évidence sur la figure 6 où l'on a tracé les résultats expérimentaux concernant cinq cultures différentes.

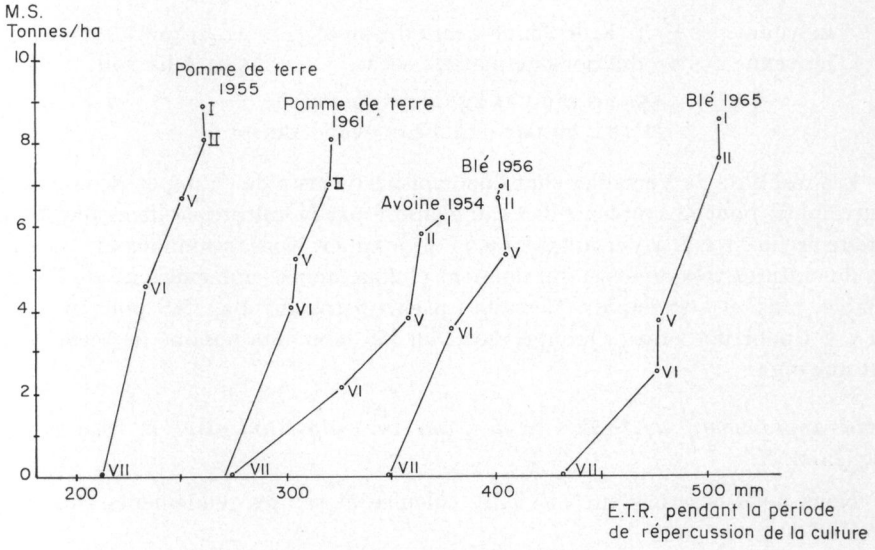


FIG. 6. — *Relation entre E. T. R. limitée à la période de répercussion de la culture et la production de matière sèche suivant les conditions chimiques*

Efficacité de l'eau évapotranspirée.

A propos des 7 cultures notées ci-dessus, nous avons calculé le nombre de litres d'eau nécessaire à la formation de un kilogramme de matière sèche ainsi que la quan-

tité de matière sèche produite par millimètre d'eau évapotranspirée et par hectare :

	Litres d'eau nécessaires à la formation de 1 kg de matière sèche (l)	Matière sèche produite par mm d'eau évapotranspiré et par hectare (kg)
Case VI	1 345	7,4
Case V	815	12,2
Case II	602	16,6
Case I	568	17,5
Moyenne pour 9 cultures dans la case I	553	18,05

Le calcul est effectué en divisant la moyenne des E. T. R. pour les 9 périodes de répercussion (375 mm, tabl. 1) par la moyenne des rendements en matière sèche (6,77 t) ou vice-versa. A Versailles, d'après E. M. BASTISSE (*Ann. agron.*, 1951, p. 739), le même calcul avait donné pour 18 années :

moyenne des E. T. R. (colonne 2 du tableau 6) 324,4 mm
moyenne des productions de matière sèche 5,91 t/ha soit
550 l d'eau par kg de matière sèche
et 18,2 kg par mm d'eau évapotranspiré

Les résultats de Versailles sont donc voisins de ceux de Quimper et, nous avons, d'autre part, pour le supplément d'eau évaporé par la culture en litres par kilog de matière sèche : 108 l. à Versailles, 102,9 l. à Quimper. Nous raisonnons sur une succession de cultures très diverses qui donnent chaque année, une efficacité de l'eau très variable, ainsi par exemple : Versailles a enregistré 267 l/kg MS pour un sarrasin et 1 110 l pour une orge ; Quimper 292 l/kg MS pour une pomme de terre et 931 l pour une orge.

Calcul approximatif de l'efficacité de l'eau en culture intensive et sous le climat de Quimper.

Nous nous baserons sur l'E. T. P. calculée et sur les rendements courants ou records :

Ray-grass italien (pour une période d'une année complète supposée à l'E. T. P. moyenne (TURC) c'est-à-dire 670 mm).

rendement courant 13 000 kg de MS : 670 = 19,4 kg/mm
rendement record 18 000 kg de MS : 670 = 26,8 kg/mm
(parfois obtenu)

Luzerne

rendement possible 20 000 kg de MS : 670 = 29,8 kg/mm
soit 335 l/kg MS

Orge (avril 1/2 E. T. P., mai, juin, juillet à E. T. P.)

rendement courant 8 500 kg de MS : 335 mm = 25,4 kg/mm

Blé (janvier à avril 1/2 E. T. P., mai, juin, juillet à E. T. P.)

rendement courant 15 000 kg de MS : 375 mm = 40,0 kg/mm
soit 250 l/kg MS

Pomme de terre (mai à août à E. T. P., soit 400 mm)

rendement courant 10 000 kg de MS : 400 mm = 25,0 kg/mm
rendement record 15 000 kg de MS : 400 = 37,5 kg/mm

Maïs fourrage (mai et juin 1/2 E. T. P.), juillet à octobre à E. T. P. soit 400 mm)

rendement courant 15 000 kg de MS : 400 mm = 37,5 kg/mm
rendement record 20 000 kg de MS : 400 = 50,0 kg/mm
(parfois obtenu)
soit 200 l/kg MS

II. — BILAN CHIMIQUE

Résultats et discussion

Les installations lysimétriques permettent l'étude du bilan des éléments chimiques à partir de l'analyse des eaux de drainage et de l'analyse des récoltes. Les apports d'engrais chimiques sont connus avec suffisamment de précision mais il n'en est pas de même des apports météoriques éventuels. Les modifications subies par le sol seraient, parallèlement, fort intéressantes à suivre mais dans les installations habituelles, il n'est guère possible d'analyser les couches inférieures à 20 cm de profondeur sans perturber inégalement les conditions d'infiltration des eaux. Nous nous sommes donc contentés d'analyser, après 10 ans d'expérience, la couche arable sur 15 à 20 cm d'épaisseur.

Voyons d'abord la concentration des eaux de drainage pour les divers éléments dosés, à savoir : l'extrait sec, l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium.

a) *Composition chimique des eaux de drainage*

Dans le tableau 4, nous nous limitons aux minima, maxima et moyennes trimestriels et annuels concernant une case nue chaulée (VII) et une case cultivé (I). Pour chaque élément et pour chaque trimestre ou année, nous avions 11 chiffres parmi lesquels nous avons relevé le plus faible et le plus fort.

Influence des saisons.

La concentration de tous les éléments est, souvent, la plus faible au printemps et maximum en automne et en hiver. Pour la case nue, on constate nettement que le drainage d'automne est le plus concentré en N, CaO et K_2O. Ce phénomène a d'ailleurs déjà été mis en évidence à Versailles par Bastisse (1951 et 1955). A la reprise

TABLEAU 4

Concentration des eaux de drainage

Case I. — Cultivée et chaulée				Case VII. — Nue et chaulée			
	Mini	Maxi	Moyenne		Mini	Maxi	Moyenne
Extrait sec mg/l Trimestre				Extrait sec mg/l Trimestre			
1-3 — 1-6	221	413	*292*	1-3 — 1-6	220	536	*308*
1-6 — 1-9	—	—	—	1-6 — 1-9	—	—	—
1-9 — 1-12	244	398	*295*	1-9 — 1-12	287	472	*371*
1-12 — 1-3	244	392	*288*	1-12 — 1-3	280	569	*372*
Année	281	352,8	**279,5**	Année	352	481,3	**347,8**
Azote mg/l Trimestre				Azote mg/l Trimestre			
1-3 — 1-6	1,1	29,0	*8,4*	1-3 — 1-6	8,0	22,0	*18,5*
1-6 — 1-9	—	—	—	1-6 — 1-9	—	—	—
1-9 — 1-12	3,4	24,7	*11,7*	1-9 — 1-12	17,2	45,2	*29,0*
1-12 — 1-3	1,7	32,5	*13,3*	1-12 — 1-3	4,7	44,0	*24,0*
Année	4,2	29,9	**12,9**	Année	9,6	33,3	**25,2**
CaO mg/l Trimestre				CaO mg/l Trimestre			
1-3 — 1-6	42	98	*68,5*	1-3 — 1-6	47,5	115	*71,1*
1-6 — 1-9	—	—	—	1-6 — 1-9	—	—	—
1-9 — 1-12	41,6	74,5	*62,4*	1-9 — 1-12	61,7	109	*82,6*
1-12 — 1-3	43,4	126	*59,4*	1-12 — 1-3	42,0	105	*81,3*
Année	50,9	105,5	**66,3**	Année	61,4	110,0	**76,6**
K_2O mg/l Trimestre				K_2O mg/l Trimestre			
1-3 — 1-6	3,0	10,8	*5,6*	1-3 — 1-6	5,9	12,5	9,0
1-6 — 1-9	—	—	—	1-6 — 1-9	—	—	—
1-9 — 1-12	4,9	12,9	*8,6*	1-9 — 1-12	8,9	20,0	*14,4*
1-12 — 1-3	2,3	10,0	*6,0*	1-12 — 1-3	5,6	13,9	*9,3*
Année	3,4	9,7	**6,0**	Année	7,5	12,4	**9,9**
MgO mg/l Trimestre				MgO mg/l Trimestre			
1-3 — 1-6	2,0	15,6	*6,4*	1-3 — 1-6	2,0	21,6	*5,7*
1-6 — 1-9	—	—	—	1-6 — 1-9	—	—	—
1-9 — 1-12	2,4	14,0	*4,8*	1-9 — 1-12	2,5	16,7	*7,0*
1-12 — 1-3	2,5	14,8	*6,0*	1-12 — 1-3	2,4	17,2	*7,3*
Année	3,02	12,0	**6,2**	Année	2,6	14,2	**6,9**
P_2O_5 mg/l Trimestre				P_2O_5 mg/l			
1-3 — 1-6	0,11	0,22	*0,16*	1-3 — 1-6	0,09	0,23	*0,13*
1-6 — 1-9	—	—	—	1-6 — 1-9	—	—	—
1-9 — 1-12	0,2	0,3	*0,26*	1-9 — 1-12	0,2	0,4	*0,33*
1-12 — 1-3	0,07	0,3	*0,16*	1-12 — 1-3	0,06	0,17	*0,09*
Année	0,099	0,286	**0,17**	Année	0,085	0,181	**0,14**

de la percolation après l'arrêt estival, les eaux entraînent les nitrates qui se sont accumulés sous l'influence de la minéralisation ainsi que les cations après une période où les solutions du sol se sont concentrées. Au cours de la première période d'expérimentation de Quimper, ces mêmes variations sont observées pour l'extrait sec, l'azote et la potasse. A Clermont-Ferrand, où le drainage se poursuit en été, le maximum de concentration a lieu, au contraire, en fin de printemps (COLLIER, 1959).

Les concentrations en P_2O_5 sont trop faibles pour permettre l'observation de différences nettes.

Signalons enfin les teneurs anormalement élevées, surtout en azote, des eaux de drainage pendant les deux premières années de fonctionnement 1954 et 1955 où les moyennes sont respectivement 29,9 mg/l et 16,4 mg/l.

Influence de la végétation.

On pourrait penser avoir des eaux de drainage moins riches sous sol nu par suite de leur plus grande abondance mais il n'en est rien. Voici les moyennes annuelles pour 11 années :

	Case cultivée I (mg/l)	Case nue VII (mg/l)
Extrait sec	279	347
Azote (N).....	12,9	25,2
Potasse (K_2O)	6,0	9,9
Chaux (CaO)	66,3	76,6
Magnésie (MgO).....	6,2	6,9

Influence des amendements calcaires.

Le chaulage d'une terre très acide accroît notablement la teneur en CaO des eaux de drainage :

Case cultivée acide VI	55,3 mg/l
Case cultivée chaulée I	66,3 mg/l
Case nue acide VIII.....	69,4 mg/l
Case nue chaulée VII	76,6 mg/l

Par ailleurs, l'effet du chaulage n'apparaît pas sur la richesse de ces eaux en N, K et Mg.

Le maërl contenant 4,5 p. 100 de MgO a eu un effet très net d'enrichissement des eaux en magnésie : case I (chaux) 6,2 mg/l MgO, case IV (maërl) 7,5 mg/l MgO.

Influence des engrais phosphatés et potassiques.

La comparaison ne peut porter que sur les cases cultivées II et V dont le pH est voisin. L'accroissement des teneurs en P et K est assez net :

P_2O_5 — case V sans PK : 0,125 mg/l ; case II avec PK : 0,135 mg/l
K_2O — case V sans PK : 4,4 mg/l ; case II avec PK : 6,9 mg/l

Influence du volume du drainage.

Pour des périodes de un trimestre, il n'existe aucune corrélation entre la quantité drainée et la concentration des divers éléments dissous dans l'eau.

Comparaison avec d'autres Stations françaises.

Le tableau ci-dessous permet de comparer nos concentrations moyennes annuelles à celles de Clermont-Ferrand et de Versailles.

Concentration des eaux de drainage en mg/l

	Clermont-Ferrand		Versailles		Quimper			
	1954-1957		1933-1949		1955-1965		1942-1947	
	Sol nu	Sol cultivé	Sol nu	Sol cultivé	Sol nu	Sol cultivé	Sol nu	Sol cultivé
Extrait sec	900*	900	625	506	347	279	280	270
N	100	40	53,4	29,5	25,2	12,9	20	8
P_2O_5			0,13	0,11	0,14	0,17	0,20	0,20
K_2O	30	30 à 50	3,5	2,6	9,9	6,0	12	25
CaO	225	200	187,6	164,7	76,6	66,3	70	55
MgO	40 à 50	50 à 60	12,9	11,4	6,9	6,2	6	5

* Pour Versailles et Quimper (1955-65), il s'agit des moyennes arithmétiques effectives tandis que pour Clermont et Quimper (1942-47), il s'agit d'ordres de grandeur.

COLLIER (1959) a déjà attiré l'attention sur le fait que les percolats de Clermont sont beaucoup plus riches que ceux de Versailles surtout en magnésie, potasse et soude, ceci étant dû à la forte minéralisation de la terre argilo-calcaire de Limagne. Les eaux de Quimper ont des teneurs voisines de celles de Versailles pour le phosphore mais elles sont moins riches en extrait sec, azote, calcium et magnésium, plus riches en potassium. La terre mise en expérience à Versailles contient 2 p. 100 de calcaire dans l'horizon A, 14 p. 100 dans l'horizon C, elle est beaucoup plus riche en Mg échangeable mais moins riche en K échangeable que celle de Quimper (BASTISSE 1951 et 1953).

b) *Quantités d'éléments fertilisants perdus par drainage*

Les pertes d'éléments fertilisants ont été calculées en kilogramme par hectare pour chaque trimestre durant la période expérimentale. Dans le tableau 5, nous donnerons seulement les minima, les maxima et les moyennes.

C'est au cours du trimestre d'hiver (1er décembre-1er mars) qui fournit le plus d'eau drainante, que draine approximativement la moitié de la quantité annuelle de chacun des éléments dosés. Par ailleurs, on ne voit pas de parallélisme entre la hauteur des précipitations ou du drainage annuel et les pertes annuelles d'éléments fertilisants. La présence de végétation sur les lysimètres I à IV diminue fortement ces

TABLEAU 5

Quantités d'éléments fertilisants perdus par drainage

Drainage de l'azote en kg/ha

Case I. — Cultivée, chaulée				Case V. — Cultivée + chaux, sans PK			
Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne	Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne
1-3 — 1-6	0,4	12,0	*4,33*	1-3 — 1-6	0,4	10,6	*5,27*
1-6 — 1-9	0	10,3	*1,05*	1-6 — 1-9	0	17,4	*1,69*
1-9 — 1-12	1,9	46,7	*13,73*	1-9 — 1-12	0,06	71,8	*18,37*
1-12 — 1-3	2,1	81,1	*34,11*	1-12 — 1-3	0,5	82,2	*41,46*
Année	19,4	92,8	**53,23**	Année	16,2	130,8	**66,80**
Case II. — Cultivée, chaulée				Case VII. — Nue, chaulée			
1-3 — 1-6	0,7	17,8	*4,6*	1-3 — 1-6	2,9	25,2	*13,75*
1-6 — 1-9	0	13,2	*1,26*	1-6 — 1-9	0	32,5	*5,03*
1-9 — 1-12	2,3	33,3	*9,96*	1-9 — 1-12	19,5	101,0	*43,57*
1-12 — 1-3	1,1	68,1	*30,71*	1-12 — 1-3	11,6	152,8	*76,20*
Année	9,7	79,6	**46,55**	Année	33,9	271,2	**138,60**

Drainage de P_2O_5 en kg/ha

Case I. — Cultivée, chaulée				Case V. — Cultivée. chaulée sans PK			
Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne	Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne
1-3 — 1-6	0,035	0,150	*0,095*	1-3 — 1-6	0,030	0,205	*0,098*
1-6 — 1-9	0	0,125	*0,031*	1-6 — 1-9	0	0,190	*0,047*
1-9 — 1-12	0,115	0,200	*0,104*	1-9 — 1-12	0,008	0,175	*0,134*
1-12 — 1-3	0,305	0,620	*0,416*	1-12 — 1-3	0,215	0,340	*0,284*
Année	0,560	0,695	**0,648**	Année	0,383	0,785	**0,562**
Case II. — Cultivée, chaulée				Case VII. — Nue, chaulée			
1-3 — 1-6	0,035	0,195	*0,102*	1-3 — 1-6	0,015	0,155	*0,081*
1-6 — 1-9	0	0,130	*0,032*	1-6 — 1-9	0	0,205	*0,068*
1-9 — 1-12	0,110	0,110	*0,076*	1-9 — 1-12	0,240	0,360	*0,323*
1-12 — 1-3	0,210	-0,425	*0,324*	1-12 — 1-3	0,170	0,405	*0,313*
Année	0,470	0,600	**0,546**	Année	0,600	1,095	**0,785**

TABLEAU 5 (*suite*)

Drainage de K_2O en kg/ha

Case I. — Cultivée, chaulée				Case V. — Cultivée, chaulée sans PK			
Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne	Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne
1-3 — 1-6	1,3	11,9	*4,48*	1-3 — 1-6	0,9	7,05	*3,94*
1-6 — 1-9	0	5,9	*0,59*	1-6 — 1-9	0	3,8	*0,56*
1-9 — 1-12	1,5	17,2	*7,24*	1-9 — 1-12	0,2	15,0	*6,08*
1-12 — 1-3	5,9	25,3	*14,45*	1-12 — 1-3	3,9	14,7	*10,11*
Année	17,1	39,8	**26,76**	Année	13,5	32,6	**20,69**
Case II. — Cultivée, chaulée				Case VII. — Nue, chaulée			
1-3 — 1-6	1,8	15,8	*5,48*	1-3 — 1-6	3,3	18,7	*8,11*
1-6 — 1-9	0	7,2	*0,72*	1-6 — 1-9	0	16,3	*2,41*
1-9 — 1-12	1,0	20,8	*8,42*	1-9 — 1-12	8,4	45,2	*19,57*
1-12 — 1-3	7,1	24,0	*16,63*	1-12 — 1-3	9,7	37,2	*23,96*
Année	21,1	45,8	**31,27**	Année	29,5	89,5	**54,15**

Drainage de CaO en kg/ha

Case I. — Cultivée, chaulée				Case VII. — Nue, chaulée			
Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne	Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne
1-3 — 1-6	22,2	88,6	*53,29*	1-3 — 1-6	29,2	104,8	*62,37*
1-6 — 1-9	0	55,7	*5,57*	1-6 — 1-9	0	89,2	*12,77*
1-9 — 1-12	6,0	158,6	*58,32*	1-9 — 1-12	67,2	272,9	*122,87*
1-12 — 1-3	61,1	286,5	*177,18*	1-12 — 1-3	84,5	360,8	*213,75*
Année	169,2	386,9	**294,3**	Année	219,5	563,6	**411,7**
Case V. — Cultivée, chaulée sans PK				Case VIII. — Nue, acide			
1-3 — 1-6	14,2	80,9	*48,47*	1-3 — 1-6	22,6	120,9	*59,45*
1-6 — 1-9	0	75,1	*8,61*	1-6 — 1-9	0	67,7	*9,87*
1-9 — 1-12	0,78	186,0	*72,14*	1-9 — 1-12	47,6	216,6	*99,70*
1-12 — 1-3	50,7	255,8	*151,79*	1-12 — 1-3	104,2	296,9	*193,85*
Année	133,3	475,8	**282,0**	Année	234,6	448,6	**362,6**

TABLEAU 5 (*suite et fin*)

Drainage de MgO en kg/ha

Case I. — Cultivée + chaux				Case V. — Cultivée, chaulée sans PK			
Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne	Trimestre	Mini	Maxi	Moyenne
1-3 — 1-6	0,45	10,2	*4,82*	1-3 — 1-6	1,4	9,1	*3,62*
1-6 — 1-9	0	6,0	*0,60*	1-6 — 1-9	0	7,6	*0,96*
1-9 — 1-12	0,3	26,5	*5,63*	1-9 — 1-12	0,07	28,7	*5,86*
1-12 — 1-3	3,1	28,7	*17,41*	1-12 — 1-3	1,9	37,3	*13,62*
Année	11,3	62,1	**28,40**	Année	8,1	63,7	**24,00**
Case IV. — Cultivée + maërl				Case VII. — Nue, chaulée			
1-3 — 1-6	0,45	10,3	*4,81*	1-3 — 1-6	1,3	8,3	*4,50*
1-6 — 1-9	0	5,8	*0,58*	1-6 — 1-9	0	6,1	*1,04*
1-9 — 1-12	1,0	55,9	*10,98*	1-9 — 1-12	1,9	53,9	*12,54*
1-12 — 1-3	4,6	45,7	*20,66*	1-12 — 1-3	3,7	51,5	*22,65*
Année	15,3	90,1	**37,03**	Année	10,7	116,2	**40,70**

pertes par rapport aux lysimètres non cultivés : trois fois pour l'azote, deux fois pour la potasse. Comme nous l'avons signalé à propos des concentrations des percolats le chaulage ne modifie pas sensiblement les pertes en azote, potassium et magnésium mais, par contre, le maërl accroît nettement les pertes de magnésium. Les engrais potassiques augmentent les quantités de potasse drainées mais ce phénomène n'apparaît pas à propos des engrais phosphatés étant donné la très forte rétention des phosphates et la faiblesse des teneurs des solutions du sol occasionnant, de plus, des difficultés analytiques.

Comparaison avec Versailles.

Voici, mises en parallèle, les moyennes annuelles en kg par hectare :

	Versailles		Quimper	
	Cases nues	Cases cultivées	Cases nues	Cases cultivées
Extrait sec	1 355	772	1 960	1 350
N	116	45	142	62,6
P_2O_5	0,28	0,17	0,8	0,82
K_2O	7,7	3,9	56	29,1
CaO	406,8	251,1	434*	322*
MgO	27,9	17,4	39,1	30
S	65	51	40	20

* Il est probable que l'attaque du ciment des parois par les sols acides fausse légèrement ces chiffres par excès.

Le dosage des sulfates n'a été effectué à Quimper que pour 3 années, les chiffres donnés ne sont donc que des ordres de grandeur.

Pour tous les autres éléments, les chiffres sont obtenus en multipliant les teneurs données au chapitre précédent par la quantité d'eau drainée en millimètres, soit 217 mm et 152 mm pour Versailles, 563 mm et 485 mm pour Quimper.

Le volume du drainage étant, en Finistère, 2,6 fois plus élevé pour les cases nues et 3,2 fois plus élevé pour les cases cultivées, les pertes sont souvent du même ordre de grandeur malgré des teneurs moins fortes. Le potassium représente une exception importante puisqu'il est plus concentré dans les eaux de Quimper et que son drainage s'élève à 56 kg/ha (sol nu) et 29 kg/ha (sol cultivé), soit 7 fois plus qu'à Versailles.

Le drainage de la magnésie et de l'azote est nettement plus élevé aussi, celui du soufre serait inférieur. La présence de végétation réduit les quantités d'éléments drainés dans des proportions notables allant jusqu'à la moitié.

c) *Comparaison des bilans des cases nues et des cases cultivées*

Les cases cultivées perdent moins d'éléments fertilisants par drainage mais les exportations dues aux récoltes s'ajoutent pour rattraper ou dépasser ces pertes suivant les éléments. Le tableau ci-dessous donne les quantités drainées ou exportées annuellement en kg par hectare.

		Cases nues		Cases cultivées			
		Case VIII	Case VII	Case VI	Case V	Case II	Case I
Azote	Drainage ...	143	138	65,1	66,8	46,5	54,2
	Récoltes	0	0	40,2	60,4	91,7	100,6
	Total.....	143	138	105,3	127,2	138,2	154,8
P_2O_5	Drainage ...	0,78	0,78	0,60	0,56	0,54	0,65
	Récoltes	0	0	7,80	13,20	27,75	30,70
	Total.....	0,78	0,78	8,40	13,76	28,29	31,35
K_2O	Drainage ...	51,6	54,1	23,3	20,6	31,2	26,7
	Récoltes	0	0	45,3	62,6	129,1	138,9
	Total.....	51,6	54,1	68,6	83,2	160,3	165,6
CaO	Drainage ...	362	411	281	282	314	294
	Récoltes	0	0	7	14	27	31
	Total.....	362	411	288	296	341	325
MgO	Drainage ...	39,6	40,7	23,9	24,0	26,0	28,4
	Récoltes	0	0	2,55	4,65	7,1	8,25
	Total.....	39,6	40,7	26,45	28,65	33,1	36,65

Une terre cultivée sans engrais ni chaux (exemple de la case VI) s'épuisera donc moins vite qu'une terre en jachère nue, quant à l'azote, la chaux et la magnésie.

On remarquera aussi que dans les conditions de notre expérience (production de 6 tonnes/ha/an de matière sèche), les récoltes plus le drainage n'exportent pas plus

d'azote, de chaux et de magnésie que le même sol laissé sans culture. Par contre, l'exportation d'acide phosphorique et de potasse est fortement accrue (E.-M. BASTISSE et S. HÉNIN, 1955).

d) *Appauvrissement du sol au cours de la période de 10 ans* (1954-1965) *pour les lysimètres sans engrais ni chaux*

Bases échangeables.

Rappelons les teneurs en K_2O, CaO et MgO échangeables (mg par kg de terre fine) :

	Teneur initiale en 1954 couche 0-20 cm	Teneur en 1964	
		Case VI (0-20)	Case VIII (0-20)
K_2O	200	109	120
CaO.....	500	460	230
MgO.....	80	5	< 5

L'abaissement des teneurs est donc très sensible pour K_2O, CaO et surtout MgO.

Voyons maintenant ce que représente la fraction drainée par rapport au stock initial de ces bases échangeables contenu dans la totalité du profil (les calculs sont basés sur 1 325 kg de terre fine et les teneurs moyennes du profil entier : K_2O 120 mg/kg, CaO 290 mg/kg, MgO 34 mg/kg).

	Stock initial en g/case	Drainé en 12 ans Case VIII		P. 100 drainé annuellement	Versailles p. 100 drainé annuellement
		en g/case	en % du stock initial		
K_2O	160	124	77,5	6,46	1
CaO.....	380	870	229	19,08	1,2 à 1,5
MgO.....	45	96	213	17,75	1,0 à 1,4

En douze ans, le seul drainage est équivalent à plus de deux fois les quantités de Ca et Mg préexistantes sous forme dite échangeable. Si l'on fait le même calcul pour la case V (chaulée mais sans engrais PK), les pertes de potassium (drainage + récoltes) passent à 125 p. 100 de la quantité préexistante au lieu de 77,5 p. 100. Par contre, la culture diminuant l'épuisement de la magnésie, les pertes de magnésie ne sont que de 152 p. 100 pour cette même case V.

En comparaison avec les résultats de Versailles, nous pouvons dire que le pourcentage d'épuisement est beaucoup plus important à Quimper, ceci étant dû au fait que les teneurs en CaO et MgO échangeable sont, dans le premier cas, 7 à 8 fois plus fortes. Le potassium échangeable est deux fois moins élevé dans la terre de Versailles mais les quantités drainées annuellement y sont environ 8 fois moins fortes qu'à Quimper (BASTISSE, 1951).

Bases totales.

En extrapolant à la totalité du profil les teneurs en éléments totaux trouvées pour la couche arable, les réserves mises en expérience sont indiquées dans la colonne de gauche ci-dessous :

	Stock initial en g/case	Drainé en 12 ans Case VIII		P. 100 drainé annuellement	Versailles p. 100 drainé annuellement
		en g/case	en % du stock initial		
K_2O	46 400	124	0,27	0,022	0,006
CaO.....	4 900	870	17,76	1,48	0,9 à 1,2
MgO.....	2 650	96	3,58	0,30	0,06 à 0,08

A Quimper, les quantités de K, Ca et Mg provenant de l'altération des minéraux et drainées par la case VIII acide et non cultivée sont données dans la deuxième colonne du tableau ci-dessus. Le pourcentage moyen annuel est égal à celui de Versailles pour Ca mais environ quatre fois plus fort pour K et Mg.

Le stock initial de Ca est un peu plus fort à Versailles pour une quantité drainée voisine. Pour le potassium total, il en est de même que pour le potassium échangeable : stock deux fois plus fort à Quimper et drainage huit fois plus fort. Pour le magnésium, le stock est deux fois moins fort à Quimper pour un drainage deux fois plus fort d'où un pourcentage annuel moyen de drainage environ quatre fois plus fort. Dans le tableau du chapitre précédent (chap. c), on a pu voir que les éléments libérés et drainés, en provenance essentielle de l'altération des minéraux du granite, correspondent à 51 kg/ha de K_2O, 362 kg/ha de CaO, 39 kg/ha de MgO.

Carbone et azote.

Les dosages de carbone et d'azote total dans la couche 0-20 cm donnent les chiffres ci-dessous :

	1954	Indice	1964	Indice	Pourcentage moyen de perte annuelle
Azote total p. 1000 de terre fine					
Case VIII. — nue, acide.....	4,26	100	3,90	91,7	0,83
Case VII. — nue, chaulée.....	4,25	100	3,66	86,1	1,39
4 cases cultivées I à IV (moy. des 4) ..	4,26	100	4,07	95,6	0,44
Carbone p. 1 000 terre de fine					
Case VIII. — nue, acide.....	46,1	100	40,0	86,7	1,33
Case VII. — nue, chaulée.....	46,2	100	38,8	83,9	1,61
4 cases cultivées I à IV (moy. des 4) ..	46,0	100	42,7	92,8	0,72
Rapport C/N					
Moyenne des 2 cases nues.....	10,84		10,42		
Moyenne des 4 cases cultivées	10,79		10,49		

Les erreurs provenant de la plus ou moins bonne représentativité des échantillons de sol sur lesquels on a fait les analyses peuvent être assez importantes. Pour les sols cultivés, nous avons une moyenne de 4 cases pratiquement identiques mais pour les sols non cultivés, il y a un écart important à propos de l'azote entre VII et VIII. Aussi bien pour le carbone que pour l'azote, la case nue chaulée (VII) a perdu le pourcentage le plus grand.

Nous pouvons retenir comme coefficient K_2 de destruction annuel moyen de la matière organique, le chiffre 0,015, soit 1,5 p. 100 (1,3 à 1,6) puisqu'il est logique de se baser sur le carbone qui, de plus, a disparu plus vite que l'azote organique (voir l'abaissement du rapport C/N). En sol cultivé, le pourcentage moyen de destruction de la matière organique descend à 0,7 p. 100 et ceci grâce à l'apport des racines des récoltes.

Comparaison avec les pertes d'azote nitrique dues au drainage.

Chaque lysimètre, contenant à l'origine 3 458 g d'azote (Kjeldahl) dans ses divers horizons, a perdu en 12 ans : 338 g d'azote nitrique, soit un pourcentage moyen annuel de 0,81 p. 100 et, ceci dans le cas du sol nu. Ce pourcentage est inférieur à celui des pertes de carbone. D'une part, nous ne pouvons pas savoir si l'azote nitrifié est entièrement drainé, d'autre part, il est certain que les couches inférieures à 20 cm participent à la minéralisation mais, peut-être, avec un taux plus faible. En effet, si l'on admettait que l'azote drainé provient uniquement de la couche 0-20 cm, le taux de minéralisation serait de 2 p. 100, donc supérieur au taux de perte de l'azote ainsi que du carbone (qui est d'environ 1,5 p. 100). Des conclusions identiques ont été tirées à Clermont et à Toulouse, le calcul précédent donnant respectivement 3,7 p. 100 (COLLIER, 1966) et 3,8 et 4,3 p. 100 (GADET et SOUBIES, 1962). A Versailles, l'azote nitrique drainé annuellement représente environ 1 p. 100 du stock total d'azote initial mis en expérience, à Clermont 1,2 p. 100 mais, pour cette dernière localité, ce pourcentage annuel de perte est le même que celui de la chute du taux de carbone et d'azote dans la couche 0-20 (1,1 p. 100) (COLLIER, 1966).

Le défaut de ces installations réside dans le fait de ne pas permettre, facilement et pendant le cours de l'expérience, l'analyse des horizons du sous-sol.

CONCLUSIONS

Sous le climat océanique et pluvieux de Quimper, la quantité d'eau drainée par les cases lysimétriques maintenues sans végétation est au moins deux fois supérieure à celle enregistrée à Versailles, Clermont-Ferrand ou Toulouse. Pour les cases cultivées, la disproportion est encore plus importante : trois fois plus qu'à Versailles. La régression pluie-drainage est hautement significative et l'évaporation est souvent proche du maximum permis par les conditions de température, d'hygrométrie et d'agitation de l'air ; tout excès de précipitations se trouve alors presque entièrement drainé.

L'évapotranspiration de la case produisant les meilleurs rendements (E. T. R.) et l'évapotranspiration potentielle, calculée selon la formule de TURC (E. T. P.) sont assez proches l'une de l'autre.

L'efficacité de l'eau évapotranspirée s'accroît fortement avec l'amélioration des conditions chimiques du sol mais reste faible dans cette expérience puisqu'il n'a pas été fait usage d'engrais azotés. La teneur des eaux de drainage en éléments chimiques est moins forte qu'à Versailles pour l'azote, la chaux, la magnésie mais plus forte pour la potasse. Du point de vue agronomique, nous pouvons retenir que les pertes par les eaux de drainage des lysimètres cultivés s'élèvent à 60 unités pour l'azote, 0,8 unité pour l'acide phosphorique, 30 unités pour la potasse, 300 unités pour la chaux, 30 unités pour la magnésie, 20 unités pour le soufre. Soulignons, particulièrement, l'importance des drainages de K_2O et MgO qui sont très supérieurs à ceux de Versailles. L'abaissement des teneurs en bases échangeables de la couche arable des cases non cultivées (K_2O, CaO, MgO) est bien mise en évidence par l'analyse chimique de la couche arable ainsi que par les quantités dosées dans les eaux de percolation. La chute du taux de carbone de la couche 0-20 cm au cours d'une période de 10 ans, nous permet de fixer un pourcentage moyen annuel de destruction de la matière organique voisin de 1,5 p. 100 (coefficient $K_2 = 0{,}015$) pour le sol non cultivé et sans aucun apport organique. Ce taux moyen annuel de destruction de la matière organique descend à 0,7 p. 100 (coefficient K_2 apparent $= 0{,}007$) en sol cultivé.

L'expérience se poursuit actuellement mais, depuis 1966, on emploie des engrais azotés qui, en accroissant les rendements, vont nous donner des renseignements plus proches de ce qui se passe en culture intensive en matière de pertes par drainage et de mesure de l'efficacité de l'eau évapotranspirée.

Reçu pour publication en décembre 1968.

SUMMARY

RESULTS OF TWELVE YEARS' LYSIMETRIC OBSERVATIONS AT QUIMPER (FRANCE) (1954-1965)

This article gives the results of observations, recorded over a 12-years period (1954-1965) on the lysimeters at Quimper. This station is located in the extreme western area of the country, where the climate displays a very oceanic character with a mean annual temperature of 11.4°C and a mean rainfall of 1 089 mm. The lysimeters have a surface area of 2 m² and a depth of 1 m ; they contain a granitic « sandy-loam, humus-like » very acid soil.

The quantity of water, drained off annually beneath the bare lysimeters is a mean 563 mm ; it is only 485 mm beneath the cultivated lysimeters, in relation to a mean annual production of 6 150 kg dry matter per hectare. There is a good agreement between the true evapotranspitation of the cultivated lysimeters and the potential evapotranspiration, calculated from the TURC formula. The mean annual figures are 609 mm for the true evapotranspiration and 667 mm for the potential evapotranspiration.

The effectiveness of the water, which has undergone evapotranspiration varies from 7.4 kg dry matter per hectare per mm water to 17.5 kg dry matter in the case of an improvement in the chemical conditions of the soil ; these values correspond to 1345 and 568 l water per kg dry matter formed. These comparative figures relate to a lysimeter, filled with acid earth and without the addition of fertilizers, and a lysimeter filled with the same earth, but which has been limed and received an application of phosphate and potassium fertilizers. No nitrogen fertilizers were applied during this experiment, which explains the still very low figures for the « effectiveness of water, which has undergone evapotranspiration ».

Chemical analysis of the drainage waters was carried out quarterly, thus enabling the drainage losses per kg/hectare to be determined :

— uncultivated lysimeter :

N : 142 ; P_2O_5 : 0.8 ; K_2O : 56 ; CaO : 434 ; MgO : 39

— cultivated lysimeter :

N : 62 ; P_2O_5 : 0.8 ; K_2O : 29 ; CaO : 322 ; MgO : 30

If to these drainage losses are added the amounts removed with the harvest, we see that the cultivated soil does not lose more N, CaO or MgO than the bare soil, but considerably more P_2O_5 and K_2O. Over the 12-years period the proportions of the initial stock of exchangeable bases, provided for experimental purposes, which were carried away by the percolation waters were : 77.5 p. 100 for K_2O, 229 p. 100 for CaO and 213 p. 100 for MgO.

Over this same period, the fall in the carbon and total nitrogen content of the arable layer (0-20 cm,) of the bare soil was a mean 1.5 p. 100 *p. a.* whereas the quantity of nitrate nitrogen, drained off, was a mean 0.8 p. 100 p. a., based on the initial stock of total nitrogen.

ZUSAMMENFASSUNG

ERGEBNISSE VON ZWÖLF JAHREN LYSIMETRISCHER BEOBACHTUNGEN BEI QUIMPER (FRANCE)

Dieser Bericht zeigt die Ergebnisse der während zwölf Jahren (1954-1965) mit den Lysimetern bei Quimper durchgeführten Beobachtungen. Dieser Ortschaft liegt im äussersten Westen des Landes mit besonders ozeanischem Klima, mit einer durchschnittlichen jährlichen Temperatur von 11,4°C und einer durchschnittlichen Regenhöhe von 1 089 mm. Die Lysimeter haben eine Flächez von 2 m² und eine Tiefe von 1 m. Sie besitzen einen stark sauere1 « humushaltigen sand-lehmigen » granitischen Boden.

Die jährlich durch die nicht kultivierten Lysimeter drainierte Wassermenge erreicht durchschnittlich 563 mm ; sie beträgt nur 485 mm bei den für eine durchschnittliche Jahreserzeugung von 6 50 kg Trockenmasse je ha kultivierten Lysimetern. Eine gute Übereinstimmung besteht zwischen der reellen Verdampfungsausschwitzung der kultivierten Lysimeter (E. T. R.) und der gemäss der Formel von TURC berechneten potentiellen Verdampfungsausschwitzung (E. T. P.) Der jährllich Durschnittswert beträgt 609 mm für E. T. R. und 667 mm für E. T. P.

Die Wirksamkeit des ausgeschwitzten Wassers steigt mit der Verbesserung der chemischen Bedingungen des Bodens von 7,4 kg Trockenmasse je ha und je mm Wasser, bis zu 17,5 kg, was 1 345 und 568 Litern Wasser je kg gebildeter Trockenmasse entspricht. Dieser Vergleich bezieht sich auf eine mit sauerer und ungedüngter Erde gefülltes Lysimeter und ein mit derselben, jedoch kalkhaltigen und mit phosphor- und kalihaltigem Dünger versehener Erde gefüllten Lysimeter. Im Laufe dieser Untersuchung wurden keine stickstoffhaltigen Dünger verwendet ; dies erklärt ; warum die « Wirksamkeit des ausgeschwitzten Wassers » moch zu schwach ist.

Die chemische Analyse des Dränierungswassers wurde viertel jährlich durchgeführt und erlaubte die Verluste durch Dränierung in kg je ha wie folgt festzustellen :

— Lysimeter mit nicht kultiviertem Boden :

N : 142 ; P_2O_5 : 0,8 ; K_2O : 56 ; CaO : 434 ; MgO : 39

— Lysimeter mit kultiviertem Boden :

N : 62 ; P_2O_5 : 0,8 ; K_2O : 29 ; CaO : 322 ; MgO : 30

Werden die auf die Ernten zurückzuführenden Verluste diesen Dränierungsverlusten hinzugefügt, so ergibt sich dass, der kultivierte Boden nicht mehr N, CaO und MgO verliert als der nicht kultivierte Boden. Dagegen verliert er viel mehr P_2O_5 und K_2O. Innerhalb von 12 Jahren beträgt der Anteil des ursprünglichen Lagerbestandes an austauschbaren Grundbestandteilen, der durch das Versickerungswasser mitgerissen wurde, 77,5 p. 100 für 0,229 p. 100 für CaO und 213 p. 100 für MgO.

Im Laufe derselben Periode betrug die Abnahme an Kohlenstoff und an totalem Stickstoff der 0-20 cm dicken baufähigen Schicht des nicht kultivierten Bodens durchschnittlich jährlich 1,5 p. 100 während die drainierte Menge an Salpeterstickstoff im Durchschnitt jährlich 0,8 p. 100 hinsichtlich des anfänglichen Grundsbestandes an totalem Stickstoffs betrug.

РЕЗЮМЕ

Результаты двенадцатилетних наблюдений за лизиметрами в городе Кемпэр (1954-1965).

М. КОППЕНЭ.

Район Кемпэра расположен на крайнем западе Франции и его климат носит ярко выраженный океанический характер; средняя годовая температура этого района — порядка 11,4°, и осадков выпадает в среднем 1.089 мм в год. Окультуренные и неокультуренные лизиметрические делянки имели площадь в 2 кв. м. каждая, и глубина их была 1 м.; заполнены они были гумусовой песчано-суглинистой почвой, гранитического происхождения, с кислой реакцией.

Количество влаги дренировавшейся за год из под неокультуренных лизиметров равнялось в среднем 563 мм., в то время как из под окультуренных делянок дренаж эвакуировал только 485 мм. в год. Автор отметил существование хорошей корреляции между реальной эвапотранспирацией (E.T.R.) окультуренных лизиметров и потенциальной эвопотранспирацией (E.T.P.), вычисленной по формуле Тюрка. Средняя годовая E.T.R. равнялась 609 мм., а средняя годовая E.T.P. сотавляла 667 мм.

Улучшение химических условий почвы вызывало увеличение эффективности эвапотранспирированной влаги от 7,4 кг. сухого вещества с гектара, до 17,5 кг., что соответствует от 1345-ти, до 568-ми литрам воды на каждый килограмм образовавшегося сухого вещества. Это сравнение относится к лизиметрическим делянкам с не удобренной почвой кислой реакции и лизиметрам с той-же почвой, но известкованной и получившей фосфорную и калийную подкормки. Азотное удобрение в данном опыте не применялось, что и об'ясняет еще слишком слабую эффективность « эвапотранспирированной влаги ».

Химический анализ просочившихся вод позволил следующим образом установить, в килограммах на гектар, потери питательных элементов вызванные дренажем :

— В неокультуренных делянках :

$$N = 142;\ P_2O_5 = 0{,}8;\ K_2O = 56;\ CaO = 434;\ MgO = 39$$

— В лизиметрах под культурой :

$$N = 62;\ P_2O_5 = 0{,}8;\ K_2O = 29;\ CaO = 322;\ MgO = 30$$

Если к этим потерям прибавить вынос урожаем, то видно, что потери азота, кальция и магния в окультуренных почвах, не превышают потерь этих элементов в почвах неокультуренных; и наоборот, в почве окультуренной, потери фосфора и калия более значительны. За 12 лет опыта пропорция начального резерва обменных оснований предоставленного в распоряжение почвы, увлеченная просачивающейся водой представляла 77,5 % для K_2O, 229 % для CaO и 213 % для MgO.

В течении того-же периода уменьшение содержания углерода и общего азота в пахотном слое (0-20 см.) неокультуренной почвы представляло в среднем 1,5 % в год, в то время как пропорция нитратного азота увлеченного водами дренажа составляла в среднем 0,8 % в год, по отношению к начальному резерву общего азота почвы.

REMERCIEMENTS

MM. D. COLLIER et L. TURC trouveront ici l'expression de nos remerciements chaleureux pour les conseils donnés en cours d'expérience ainsi qu'au moment de la rédaction de ce mémoire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BASTISSE E.-M., 1951. Dix huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie. Premier mémoire. *Ann. agron.*, 727-781.

BASTISSE E.-M., 1953. Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie. Deuxième mémoire. Bilan de l'eau (53-76) ; Exportation des éléments chimiques, K_2O, P_2O_5 (331-378) ; Exportation MgO, CaO (519, 560) ; Exportation SO_3, N_2O_5, CO_2 et matières organiques (717-780), *Ann. agron.*, **19**.

BASTISSE E.-M., HÉNIN S., 1955. Dix huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie. Troisième mémoire. *Ann. agron.*, **21**, 203-232.

COLLIER D., ROBELIN M., 1959. Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne. Résultats de quatre années d'observations lysimétriques *Ann. agron.*, **4**, 415-453.

COLLIER D., 1964. Évolution et dynamisme de l'azote minéral dans les sols argilo-calcaires de Limagne *C. R. Acad. Agric.*, **50**, 1231-1251.

COLLIER D., 1966. Essais de détermination du bilan humique du sol à partir de la balance des importations et exportations d'azote. Application aux cases lysimétriques de Clermont-Ferrand. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1094-1102.

GADET R., SOUBIES L., 1962. Le bilan de l'azote dans les sols. Expérimentation de longue durée en cases lysimétriques et utilisation de l'isotope stable de l'azote ^{15}N. *C. R. Acad. Agric.*, **48**, 145-153.

ROBELIN M., 1966. L'eau et la fertilisation. *Rev. agric. Fr.*, Er.**52**, 89-94.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 13-49.

Ann. agron., 1969, **20** (2), 145-159.

INFLUENCE DU DEGRÉ DE SALIFICATION D'UN COMPOSÉ HUMIQUE SUR SON COMPORTEMENT THERMIQUE

C. JUSTE, J. DELAS

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, 33 - Pont-de-la-Maye
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

On a suivi l'évolution de quelques propriétés d'acides humiques préparés à pH 1 ou à pH 7, en présence ou en l'absence de fer, au cours du chauffage à des températures variant de 40 à 400°C. Les processus de transformation sont comparables pour tous les composés jusqu'à 250°C mais se différencient au-dessus de cette température, les acides humiques préparés à pH 7 donnant lieu à la formation de cétones aromatiques stables, alors que les acides préparés à pH 1 sont totalement détruits ; à partir de 150°C, ces derniers donnent naissance à des anhydrides d'acides très peu solubles. La nature du métal entrant dans la constitution de l'humate ne paraît pas exercer d'influence spécifique sur la décomposition thermique de ce dernier.

INTRODUCTION

Parmi les nombreuses techniques mises en œuvre pour tenter de préciser la structure des acides humiques, l'étude de la décomposition thermique de ces derniers a été fréquemment utilisée (Ubaldini et Siniramed, 1937 ; Ganz, 1944 ; Bouilloux, 1945, 1947 ; Wood, Moschopedis et Den Hertog, 1961 ; Wright et Schnitzer, 1961 ; Schwartz et Asfeld, 1963 ; Schnitzer et Hoffman, 1964 ; Felbeck, 1965 ; Schnitzer et Hoffman, 1966 *a*, 1966 *b* ; Czuchajowski, 1967).

Ces travaux ont mis en évidence que le chauffage des acides humiques en atmosphère ordinaire ou en présence d'azote provoquait surtout des réactions de décarboxylation et de déshydratation ; il convient de préciser cependant qu'il s'agissait le plus souvent d'acides humiques séparés de la fraction fulvique par précipitation en milieu très acide, c'est-à-dire de radicaux humiques associés à des protons. Schni-

TZER et HOFFMAN (1966 *a* et *b*) et LEVESQUE et SCHNITZER (1967) ont pourtant remarqué que la destruction thermique d'un même composé humique dépendait étroitement de la nature du métal associé à ce composé, les métaux polyvalents — et plus particulièrement le fer — diminuant très sensiblement la stabilité thermique des complexes organo-métalliques.

De même, BOUILLOUX (1945) a observé que la décomposition thermique d'acides humiques salifiés était différente de celle d'acides humiques libres. Comme les liaisons entre fraction minérale et fraction humique paraissent être essentiellement assurées par des radicaux carboxyliques (JUSTE et DELAS, 1967) dont la configuration peut être modifiée par l'existence même de ces liaisons, une variation importante du degré de salification de ces radicaux devrait influencer le comportement thermique de l'acide humique.

Le but de ce travail est de vérifier la validité de cette hypothèse et de préciser si la combinaison d'un métal (en l'occurrence, du fer ou du sodium) à l'acide humique modifie effectivement le comportement thermique de ce dernier.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES UTILISÉS

A. — *Préparation des acides humiques*

Ils sont extraits de l'horizon de surface d'un podzol humique développé sur sable des Landes, puis séparés et purifiés selon la technique décrite précédemment (JUSTE et DELAS, 1967) : 600 g de sol sont utilisés et le volume d'acides humiques recueilli est ajusté à 2 litres. Cette suspension est amenée à pH 1 ou à pH 7 par addition d'acide chlorhydrique ou de soude. Les acides humiques amenés à pH 1 sont isolés par centrifugation, lavés 3 fois à l'eau distillée, puis séchés à l'étuve à 40°C ; ceux dont le pH a été ajusté à 7 sont directement séchés à l'étuve à 40°C ; on prépare également des acides humiques à pH 7 enrichis en fer : pour cela on ajoute 40 ml de chlorure ferrique N à un litre de suspension d'acides humiques avant d'en amener le pH à 7 ; après 16 heures de décantation les acides humiques enrichis en fer sont isolés par centrifugation, lavés 3 fois à l'eau distillée, puis séchés à 40°C. Après séchage, les trois types d'acides humiques (pH 1, pH 7, pH 7 + Fe) sont réduits en poudre au mortier. Les teneurs en sodium et en fer de ces trois composés sont indiquées dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Teneur en fer et en sodium des acides humiques

	Na (µmol/100 mg)	Fe (µmol/100 mg)	Na + Fe (µmol/100 mg)
Acide humique préparé à pH 1	5	7	12
Acide humique préparé à pH 7	205	7	212
Acide humique préparé à pH 7 et enrichi en fer .	127	100	227

Ce tableau montre que l'acide humique préparé à pH 1 contient environ 20 fois moins de cations que les acides humiques préparés à pH 7 ; la proportion de sodium est très élevée dans le cas de l'acide humique amené à pH 7 en l'absence de fer, alors que des quantités de sodium et de fer à peu près égales se sont combinées au composé humique dont on a ajusté le pH à 7 en présence de fer. Si le degré de salification peut donc être considéré comme sensiblement identique pour les deux composés préparés à pH 7, la nature des métaux assurant cette salification n'est pas la même, puisqu'il s'agit essentiellement de sodium dans un cas et d'un mélange de sodium et de fer dans l'autre.

B. — *Chauffage des acides humiques*

100 mg de poudre préalablement séchée à 40°C sont placés pendant 2 heures dans une étuve ventilée, réglée successivement à 100, 150, 200, 250, 300, 350 et 400°C.

C. — *Déterminations effectuées sur les acides humiques chauffés à différentes températures*

1° *Variation de poids :* pesée avant et après passage à l'étuve.

2° *Variation de la teneur en carbone :* elle est appréciée par comparaison des teneurs en carbone (ANSTETT, 1956) des composés humiques avant et après chauffage ; la variation de poids étant connue, on peut calculer la quantité totale de carbone qui a disparu au cours du chauffage.

3° *Solubilité dans la soude N/100 :* après chauffage, les poudres d'acides humiques sont transvasées dans des tubes de centrifugeuse où l'on ajoute 50 ml de soude N/100 ; après une heure d'agitation, on détermine le taux de carbone du filtrat ; la quantité totale de carbone que renferme la poudre après chauffage étant connue, on peut calculer le pourcentage de carbone dissous par la soude N/100.

4° *Spectres d'absorption dans l'infrarouge :* les poudres d'acides humiques chauffées sont mélangées à du bromure de potassium (1 mg de poudre pour 100 mg de KBr) et les pastilles sont examinées à l'aide d'un appareil Unicam SP 200 à optique de NaCl.

II. — RÉSULTATS OBTENUS

A. — *Variation de poids des acides humiques* (fig. 1)

Jusqu'à 250°C, les trois types de produits humiques (acide humique amené à pH 1, acide humique amené à pH 7, acide humique enrichi en fer et amené à pH 7) se comportent de manière analogue ; la perte de poids, déjà sensible dès 100°C, augmente ensuite régulièrement avec la température. Au-dessus de 250°C, l'allure des courbes de décomposition thermique se différencie nettement : l'acide humique préparé à pH 1 subit une perte de poids très importante, qui atteint 92 p. 100 à 400°C, alors que les acides humiques préparés à pH 7 en présence ou en l'absence de fer ne perdent, à cette température, que 40 p. 100 de leur poids initial.

B. — *Variation de la teneur en carbone des acides humiques* (fig. 2)

La teneur en carbone des composés humiques préparés à pH 1 augmente régulièrement jusqu'à 200°C ; au-dessus de cette température, le taux de carbone décroît brutalement et devient nul à 400°C.

L'évolution de la teneur en carbone des humates est nettement différente : elle augmente légèrement jusqu'à 250°C, puis d'une manière plus importante au-dessus de cette température. A aucun moment on n'observe une chute de la teneur en carbone identique à celle qui se produit pour les acides humiques préparés à pH 1.

On peut calculer la perte globale de carbone en faisant le produit du poids d'acides humiques subsistant après chauffage par leur teneur en carbone : les variations de cette donnée sont indiquées dans la figure 3.

Les trois courbes sont très semblables jusqu'à 250°C mais la perte globale de carbone s'élève ensuite très brusquement dans le cas de l'acide humique préparé à

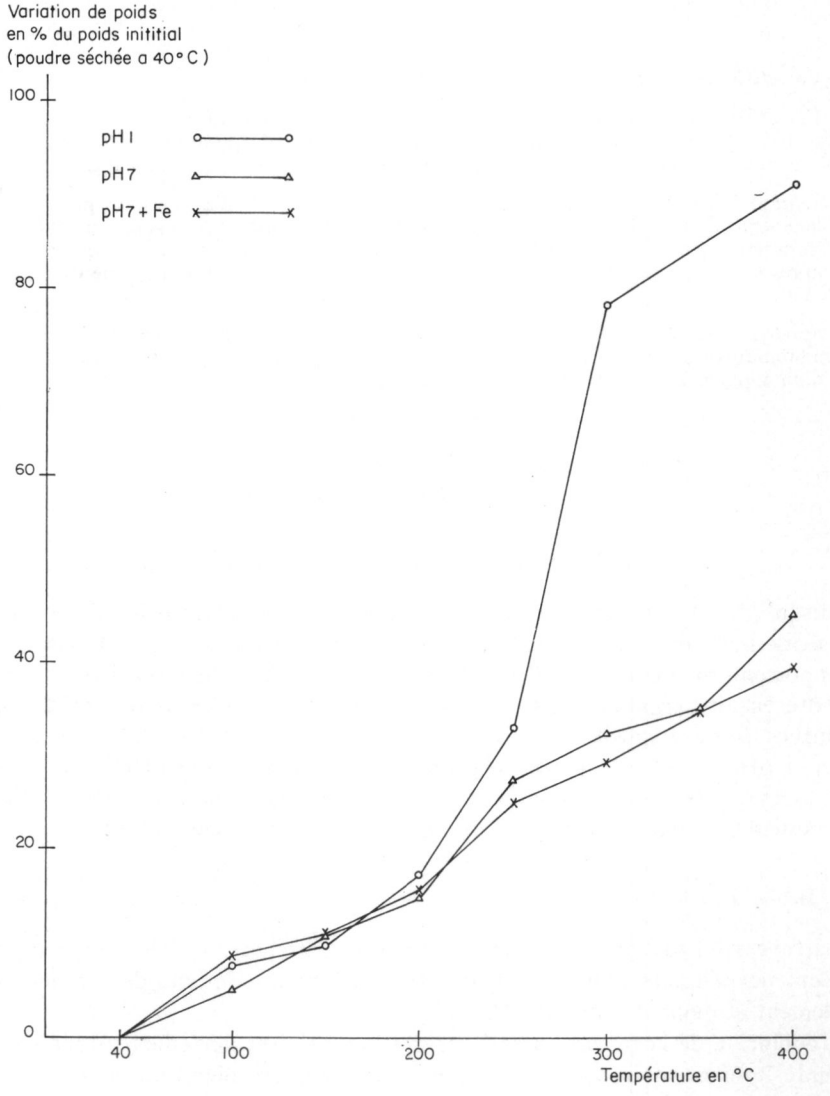


FIG. 1. — *Influence de la température de chauffage sur la variation de poids d'acides humiques à divers degrés de salification*

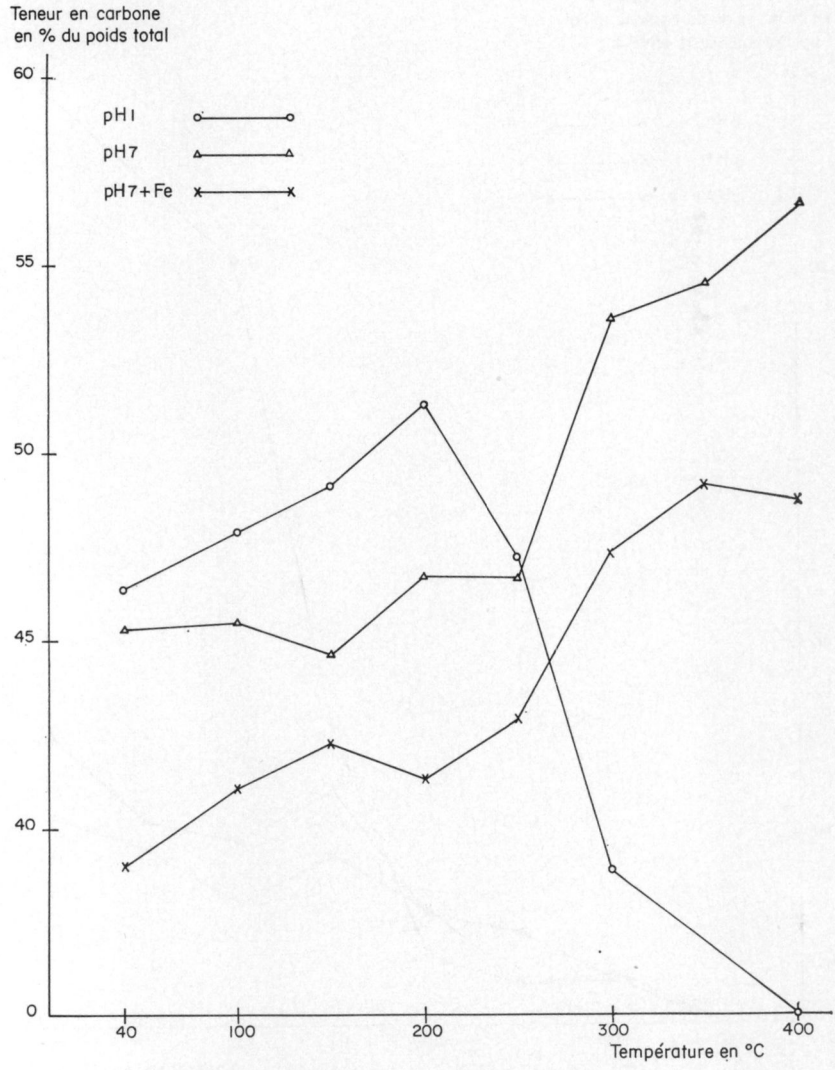


FIG. 2. — *Influence de la température de chauffage sur la variation de la teneur en carbone d'acides humiques à divers degrés de salification*

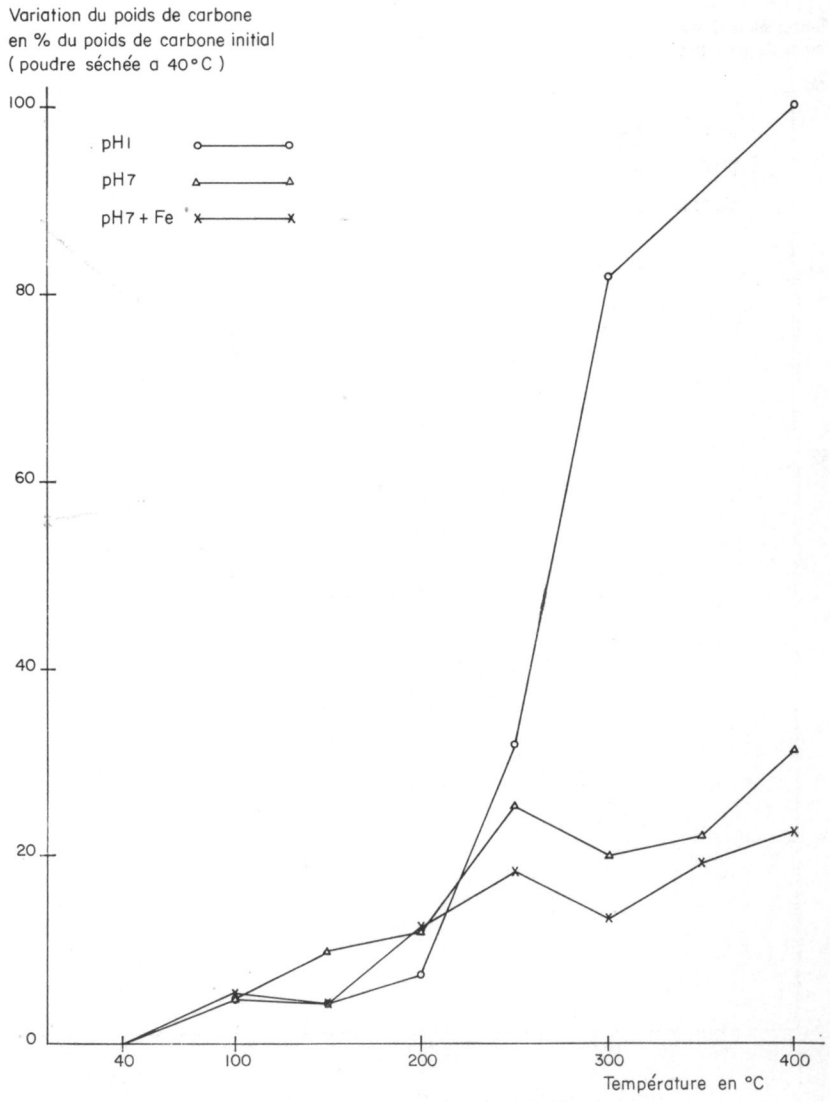


FIG. 3. — *Influence de la température de chauffage sur la perte globale en carbone d'acides humiques à divers degrés de salification*

pH 1, alors qu'elle demeure à peu près constante pour les acides préparés à pH 7 et diminue même légèrement à 300°C.

C. — *Solubilité des acides humiques dans la soude N/100* (fig. 4)

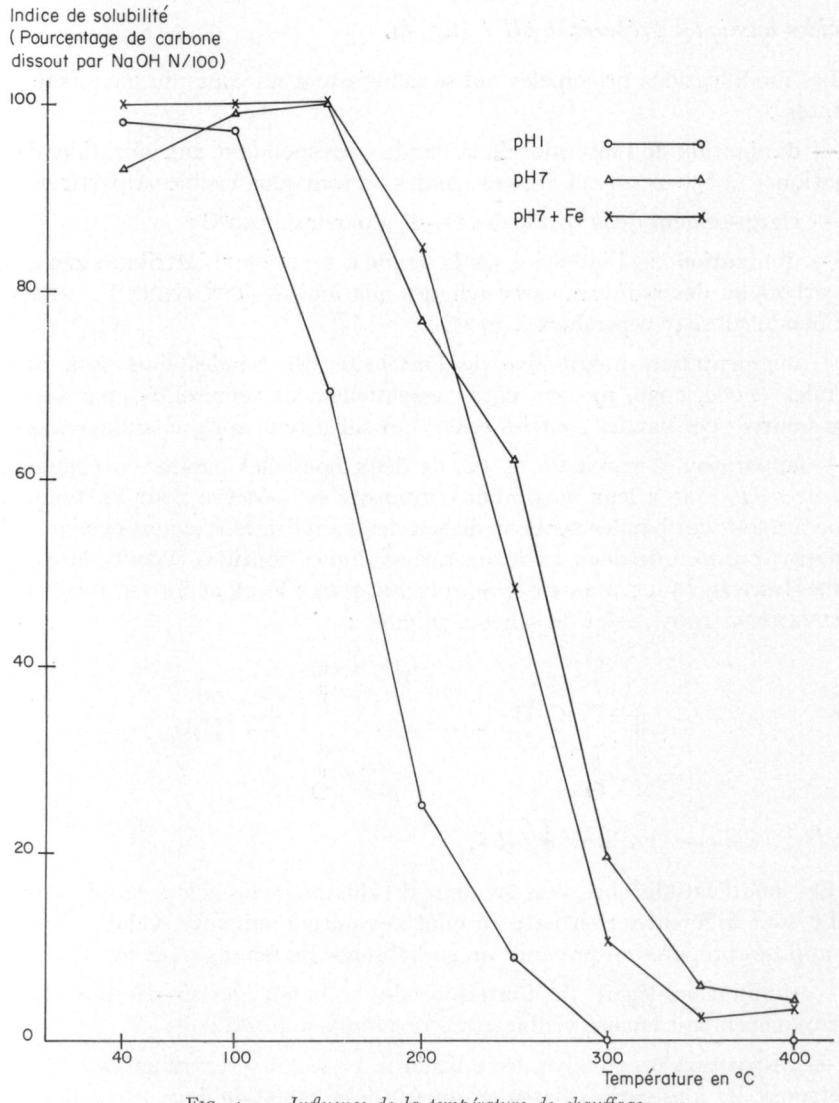


FIG. 4. — *Influence de la température de chauffage sur la solubilité dans la soude d'acides humiques à divers degrés de salification*

Les composés humiques préparés à pH 7 sont totalement solubles dans la soude N/100 jusqu'à 150°C ; leur solubilité diminue ensuite modérément jusqu'à 250°C puis d'une manière plus importante au-dessus de cette température pour devenir nulle à 400°C.

La solubilité des composés humiques préparés à pH 1 évolue fort différemment : elle diminue dès 100°C, devient très faible entre 150 et 200°C et s'annule à 300°C.

D. — *Spectres d'absorption dans l'infrarouge des acides humiques*

1. *Acides humiques préparés à pH 1* (fig. 5).

Les modifications principales qui se manifestent au cours du chauffage sont les suivantes :

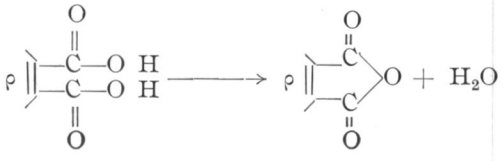
— diminution de l'intensité de la bande correspondant aux vibrations des C—H aliphatiques (2 850-2 920 cm^{-1}) ; ces bandes ne sont plus visibles à partir de 250°C ;

— élargissement de la bande des O—H à partir de 150°C ;

— diminution de l'intensité de la bande à 1 720 cm^{-1}, attribuée généralement aux carbonyles des radicaux carboxyliques non ionisés (Thenys et Posner, 1967) ; cette bande subsiste cependant à 300°C ;

— augmentation progressive de l'intensité des bandes dues aux impuretés minérales (1 080, 1 030, 790, 770 cm^{-1}) essentiellement représentées par des silicates ou du quartz ; ces bandes sont les seules qui subsistent après chauffage à 400°C ;

— apparition, à partir de 150°C, de deux nouvelles bandes ou épaulements à 1 770 et 1 840 cm^{-1} ; leur maximum d'intensité est observé pour les températures de 200 à 250° ; ces bandes seraient dues à des anhydrides d'acides cycliques formés par déshydratation de deux radicaux carboxyliques contigus (Wood, Moschopedis et Den Hertog, 1961 ; Wright et Schnitzer, 1961 ; Falk et Smith, 1963 ; Wagner et Stevenson, 1965), selon le schéma suivant :



2. *Acides humiques préparés à pH 7.*

Les modifications observées au cours du chauffage des acides humiques préparés à pH 7 sont différentes ; on note en effet l'évolution suivante, valable autant pour les composés préparés en présence qu'en l'absence de fer (fig. 6 et fig. 7) :

— diminution légère de l'intensité de la bande des C—H aliphatiques qui demeure cependant encore visible après chauffage à 400°C ;

— disparition progressive de la bande à 1 380 cm^{-1}, attribuable à la vibration symétrique des ions carboxylates et apparition à 350°C de deux nouvelles bandes à 880 et 1 440 cm^{-1}, dues à la présence de carbonates dans le résidu d'acide humique (Bellamy, 1964) ;

— apparition, entre 200 et 250°C, d'une autre bande assez mal résolue, dans la région comprise entre 1 690 et 1 700 cm^{-1} ; cette bande traduit, d'après Bellamy (1964), la présence de cétones aromatiques ; son intensité est maximum vers 300°C et diminue pour des températures de chauffage plus élevées.

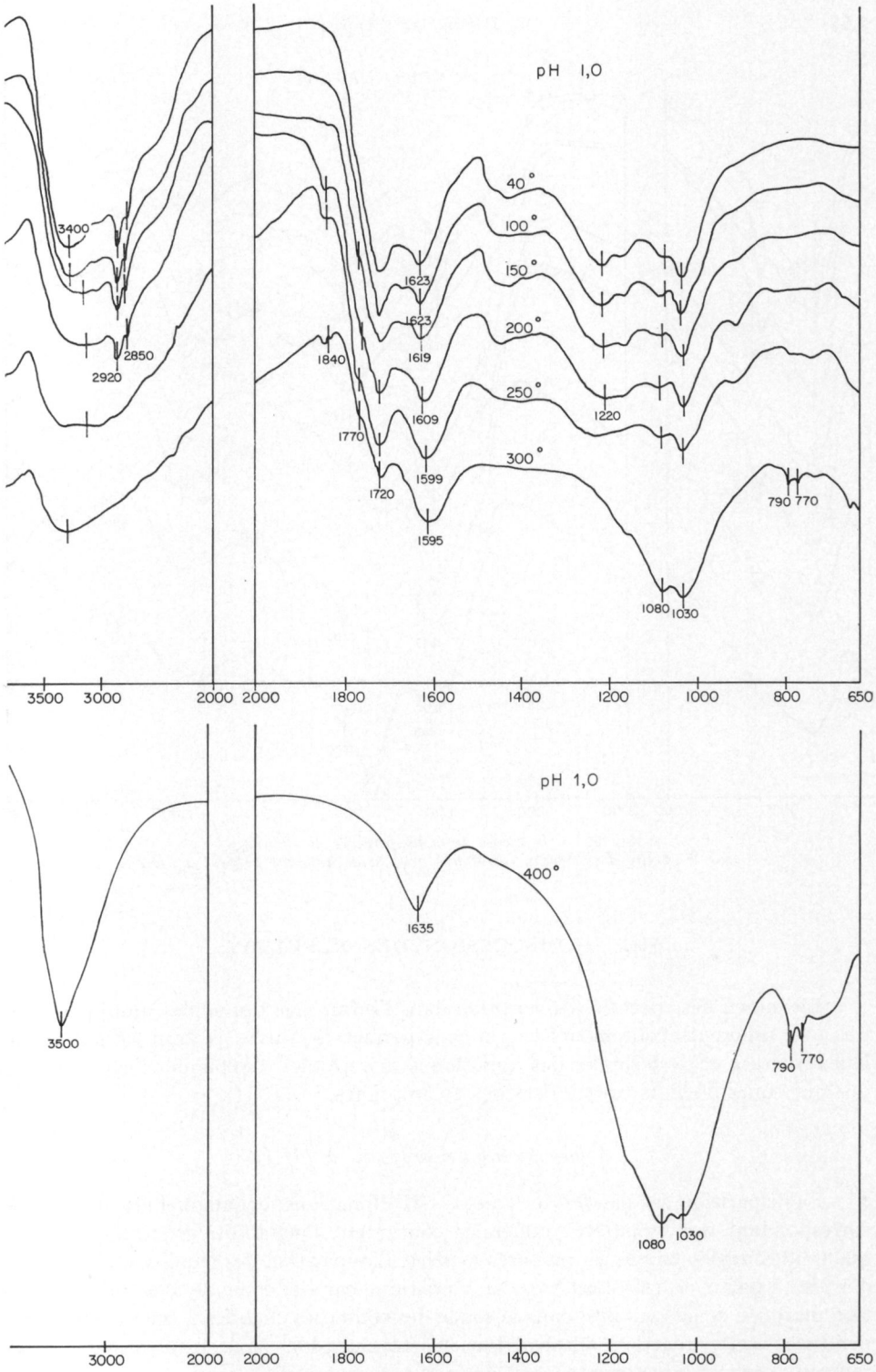


FIG. 5. — *Influence de la température de chauffage sur le spectre d'absorption infrarouge d'un acide humique préparé à pH 1*

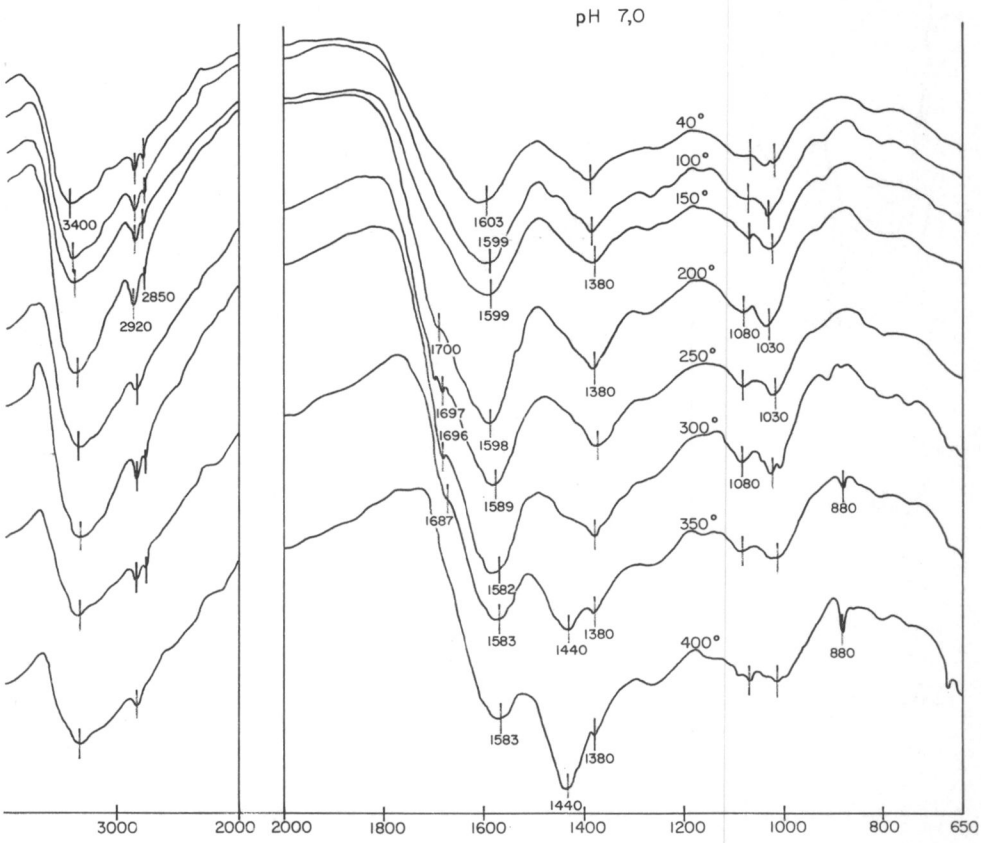


FIG. 6. — *Influence de la température de chauffage sur le spectre d'absorption infrarouge d'un acide humique préparé à pH 7*

III. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'examen des spectres d'absorption dans l'infrarouge des acides humiques soumis aux différents traitements thermiques permet de suivre la transformation de leur structure et de formuler des hypothèses susceptibles d'expliquer l'évolution de quelques-unes de leurs caractéristiques et propriétés.

Acides humiques préparés à pH 1

La disparition des bandes dues aux C—H aliphatiques et l'augmentation de celles correspondant aux impuretés minérales confirment l'instabilité thermique remarquable des acides humiques préparés à pH 1. L'apparition des bandes d'anhydrides d'acides à partir de 150°C est très caractéristique car elle coïncide avec une diminution marquée de la solubilité dans la soude des composés chauffés à cette même température ; cette réaction d'anhydrisation entraîne donc une transformation des radicaux carboxyliques non encore éliminés par décarboxylation et, en conséquence,

un renforcement du caractère hydrophobe de l'acide humique. La diminution importante de la solubilité à la suite de cette réaction confirme l'hypothèse de WOOD, MOSCHOPEDIS et DEN HERTOG (1961), selon laquelle les acides humiques contiendraient un pourcentage élevé de radicaux carboxyliques contigus susceptibles de donner naissance par chauffage à des anhydrides d'acides cycliques, hypothèse que

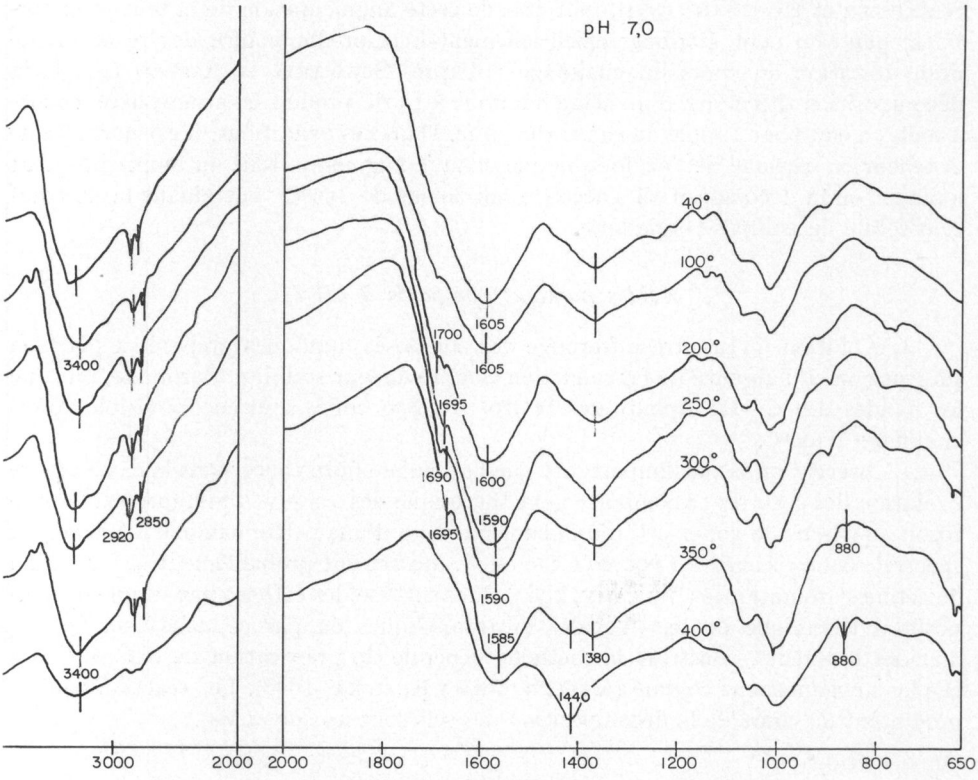


FIG. 7. — *Influence de la température de chauffage sur le spectre d'absorption infrarouge d'un acide humique préparé à pH 7 et enrichi en fer*

ne partagent pas WRIGHT et SCHNITZER (1961) et FALK et SMITH (1963), pour lesquels la formation d'anhydrides n'intéresserait qu'un faible pourcentage de radicaux carboxyliques. L'élargissement de la bande des O—H au cours du chauffage apporte cependant une preuve supplémentaire de la validité de l'hypothèse de WOOD et de ses collaborateurs, car on peut attribuer cet élargissement au caractère hygroscopique des anhydrides formés (WAGNER et STEVENSON, 1965), caractère qui entraîne une augmentation du nombre de ponts d'hydrogène dus aux molécules d'eau fixées par l'anhydride au cours de la préparation des pastilles.

La persistance, après chauffage à température élevée (300°C), de la bande située à 1 720 cm^{-1} a déjà été signalée par SCHNITZER et HOFFMAN (1964) ; ils l'attribuent au fait que cette bande serait due non seulement aux carbonyles des radicaux carboxyliques mais aussi à des carbonyles d'esters ; l'insolubilité dans la soude des composés

humiques chauffés à 300°C confirme cette interprétation, car si des radicaux carboxyliques subsistaient après chauffage à cette température, les acides humiques devraient être encore au moins partiellement solubles, ce qui n'est pas le cas.

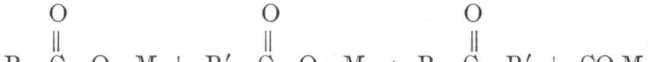
Le seul examen du spectre infrarouge ne permet pas d'expliquer l'augmentation de la teneur en carbone au cours du chauffage ; de nombreux travaux, notamment ceux de GANZ (1944), WRIGHT et SCHNITZER (1961), SCHWARTZ et ASFELD (1963), SCHNITZER et HOFFMAN (1964), font état de cette augmentation de la teneur en carbone, que l'on peut attribuer essentiellement à la prédominance des réactions de déshydratation au cours du chauffage : d'après SCHWARTZ et ASFELD (1963), la décomposition thermique d'un acide humique à 150°C produit en atmosphère d'azote 4 moles d'eau pour 1 mole de gaz carbonique. Dans ces conditions, il est normal que la teneur en carbone de l'acide humique chauffé augmente, tout au moins jusqu'au moment où la décomposition s'accélère (au-dessus de 250°C), entraînant la destruction totale du composé organique.

Acides humiques préparés à pH 7

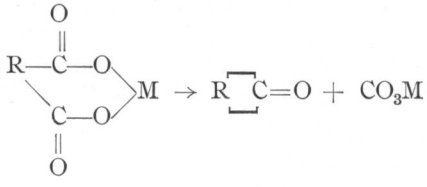
L'évolution du spectre infrarouge des composés humiques préparés à pH 7 en présence ou en l'absence de fer rend bien compte de leur stabilité thermique, puisque les bandes des C—H aliphatiques (2 920 et 2 850 cm^{-1}) sont encore visibles après chauffage à 400°C.

L'observation la plus importante que l'on puisse faire concernant la liaison entre évolution des spectres et comportement thermique des composés humiques est l'apparition au-dessus de 200-250°C d'un épaulement ou d'une petite bande dans la région spectrale comprise entre 1 690 et 1 700 cm^{-1}, qui traduit probablement la formation de cétones aromatiques (BELLAMY, 1964). La synthèse des cétones par simple décomposition thermique de sels d'acides dicarboxyliques ou par condensation de sels d'acides différents, constitue la méthode générale de préparation de ces composés la plus anciennement connue (HALLER, 1896 ; RUZICKA, 1928). Les réactions qui se produisent au cours de la décomposition des sels sont les suivantes :

(M = métal)



ou, si l'on part d'un sel de diacide :



Au cours de ces réactions on obtient non seulement une cétone mais également le carbonate du métal initialement lié à l'acide ; dans le cas de composés humiques préparés à pH 7, les bandes de l'ion carbonate apparaissent effectivement dès 350°C, ce qui confirme l'hypothèse de BOUILLOUX (1945) selon laquelle les acides humiques salifiés se comporteraient au cours du chauffage comme des sels de polyacides et

pourraient, par conséquent, donner naissance à des produits cétoniques : l'emplacement de la bande des carbonyles (1 690 à 1 700 cm^{-1}) permet de préciser qu'il s'agit essentiellement de cétones aromatiques (BELLAMY, 1964).

La formation de ces composés au cours du chauffage des acides humiques préparés à pH 7 en présence ou en l'absence de fer permet de fournir une explication à la relative stabilité thermique de ces derniers ; il est en effet bien établi que la majorité des cétones sont thermiquement stables, certaines d'entre elles pouvant distiller à température élevée sans décomposition notable. D'après l'examen des spectres IR, c'est à 300°C que la production de cétones dans le composé humique paraît la plus intense et c'est aussi à cette température que la teneur en carbone de l'acide humique augmente brusquement ; ceci peut expliquer qu'à cette température la perte globale en carbone soit finalement plus faible qu'à 250°C.

En définitive, c'est donc le pH de préparation des acides humiques, c'est-à-dire le pourcentage de protons demeurant associés au radical humique, qui détermine le mécanisme de la décomposition thermique au-dessus de 250°C ; la nature du métal combiné au produit organique ne paraît exercer aucune influence spécifique sur la nature des transformations observées.

CONCLUSION

Les résultats obtenus dans ce travail démontrent que, jusqu'à 250°C, le processus de la décomposition thermique des acides humiques ne dépend qu'assez peu de leur degré de salification : les réactions de décomposition sont essentiellement des réactions de décarboxylation et de déshydratation qui s'accompagnent, dans le cas particulier des acides humiques préparés à pH 1, de la formation d'anhydrides d'acides entre 150 et 200°C ; l'apparition de ces nouveaux composés entraîne une brusque diminution de la solubilité et de la mouillabilité des acides humiques ; c'est en faisant intervenir la formation d'anhydrides d'acides qu'on pourrait peut-être expliquer l'augmentation de la stabilité structurale d'un sol enrichi en acides humiques et chauffé à 200°C (MONNIER, 1965).

Au-delà de 250°C, la destruction des acides humiques peu salifiés s'accélère pour devenir complète à 400°C, alors que les composés fortement salifiés donnent naissance à des produits cétoniques, ce qui leur confère une relative stabilité thermique.

Reçu pour publication en février 1969.

SUMMARY

EFFECTS OF THE DEGREE OF SALIFICATION
OF A HUMIC COMPOUND ON ITS THERMAL PROPERTIES

Evolvement of the weight (fig. 1), carbon content (fig. 2 and 3), solubility in soda (fig. 4) and the infrared spectrum (fig. 5 to 7) of either slightly or highly salified humic acids has been observed at incremental temperatures from 40°C to 400°C. Substantial metal enrichment of the acid occurs only at temperatures higher than 250°C, whereupon the free humic acids are promptly destroyed whereas the highly salified compounds originate heat-stable aromatic ketones. Below 250°C, decompositions are chiefly decarbolyxation and dehydration reactions conducing, when instancing slightly

salified humic acid, to the formation of insoluble acid anhydrides. The nature of the metal associated with humic compounds does not apparently produce specific effects on the manner in which the thermal decomposition of these compounds is brought about.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG DES SALZBILDUNGSGRADES EINER HUMUSVERBINDUNG AUF DES VERHALTEN LETZTERER TEMPERATUREN GEGENÜBER

Die Entwicklung des Gewichts (Abb. 1), des Kohlestoffgehaltes (Abb. 2 u 3), der Löslichkeit in Soda (Abb. 4) und des infraroten Spektrums (Abb. 5 bis 7) stark oder schwach salzhaltiger Huminsaüren ist im Laufe einer Erhitzung mit ansteigenden Temperaturen (40 bis 400°C) verfolgt worden. Die anreicherung der Saüre mit Metall ist nur bei Temperaturen über 250°C von Bedeutung. Die freien Huminsaüren werden dann sehr schnell zerstört, während die stark salzhaltigen Verbindungen wärmebeständige aromatische Ketone abgeben. Über 250°C sind die Zersetzungsreaktionen hauptsächlich Dekarboxylierungs and Dehydrationsvorgänge, die im Fall der schwach salzhaltigen Huminsaüre die Bildung unlöslicher Saüreanhydride veranlassen. Die Beschaffenheit des den Humusverbindungen assozierten Metalls scheint keine spezifische Wirkung auf die thermische Zersetzung dieser verbindungen auszuüben.

РЕЗЮМЕ

Влияние степени засоленности гуминовых соединений на их реакцию в отношении тепла.

К. ЖЮСТ, Ж. ДЭЛЯ.

Авторы проследили эволюцию веса (Рис. 1), содержания углерода (Рис. 2 и 3), растворимости в NaOH (Рис. 4) и инфра-красного спектра (Рис. 5-7) слабо, или сильно засоленных гуминовых кислот подогревавшихся до определенных повышавшихся температур (от 40 до 400 °C). Размеры обогащения кислоты металлом увеличивались только начиная от температур превышавших 250 °C : свободные гуминовые кислоты подвергались тогда быстрому разрушению, в то время как соединения содержавщие большие количества солей превращались в ароматические кетоны, стабильные по отношению к теплу. Ниже 250 °C реакции разложения являлись главным образом реакциями декарбоксилирования и дегидратации, приводившие в частом случае гуминовых кислот со слабым содержанием солей, к образованию ангидридов нерастворимых кислот. Природа металла связанного с гуминовыми соединениями не имеет как-будто специфического влияния на форму их теплового разложения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANSTETT A., 1956. Sur une méthode rapide de détermination du rapport C/N dans les sols, les amendements organiques et les végétaux. *VIe Congr. Sci. Sol, B,* 693-699.

BELLAMY L. J., 1964. *The infrared spectra of complex molecules.* Methuen, London.

BOUILLOUX G., 1945. Recherches sur la décomposition pyrogénée des humates alcalino-terreux jusqu'à 600°. *Bull. Soc. Chim. Fr.,* **12,** 889-893.

BOUILLOUX G., 1947. Recherche par analyse thermique sur la pyrolyse des acides humiques et des substances connexes. *Bull. Soc. Chim. Fr.,* **14,** 227-229.

CZUCHAJOWSKI L., 1967. Theoretical consideration of humic acids decarboxylation temperature. Comparison with infra-red spectra. *Rocz. Chem.*, **41**, 237-246.

FALK M., SMITH D. G., 1963. Structure of carboxyl groups in humic acids. *Nature*, **200**, 569.

FELBECK G. T. JR., 1965. Studies on the high presure hydrogenolysis of the organic matter from a muck soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 548-555.

GANZ E., 1944. Contribution à l'étude de la structure des acides humiques naturels. *Ann. Chim.*, **19**, 202-216.

HALLER A., 1896. Sur la transformation de l'acide camphorique droit en camphre droit ; synthèse partielle du camphre. *C. R. Acad. Sci.*, **122**, 446-449.

JUSTE C., DELAS J., 1967. Influence de l'addition d'aluminium, de fer, de calcium, de magnésium ou de cuivre sur la mobilité électrophorétique, le spectre d'absorption infrarouge et la solubilité d'un composé humique. *Ann. agron.*, **18**, 403-427.

LEVESQUE M., SCHNITZER M., 1967. Organo-metallic interaction in soils. VI. Preparation and properties of fulvic acid-metal phosphates. *Soil. Sci.*, **103**, 183-190.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse, Paris.

RUZICKA M. L., 1928. Les produits à odeur de musc et les cycles à grand nombre de chaînons. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **43**, 1145-1173.

SCHNITZER M., HOFFMAN I., 1964. Pyrolysis of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 520-525.

SCHNITZER M., HOFFMAN I., 1966 *a*. A thermogravimetric approach to the classification of organic soils. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **30**, 63-66.

SCHNITZER M., HOFFMAN I., 1966 *b*. Thermogravimetric analysis of the salts and metal complexes of a soil fulvic acid. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 7-15.

SCHWARTZ D., ASFELD L., 1963. Solvation of the proton in humic acids. *Nature*, **197**, 177-178.

THENYS B. K. G., POSNER M., 1967. Nature of the carbonyl groups in soil humic acid. *Soil Sci.*, **104**, 191-201.

UBALDINI I., SINIRAMED C., 1937. Ricerche sugli acidi uminici. Nota III. *Ann. Chim. oppl.*, **27**, 94-102.

WAGNER G. H., STEVENSON F. J., 1965. Structural arrangement of functional groups in soil humic acid as revealed by infra-red analysis. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 43-48.

WOOD J. C., MOSCHOPEDIS J. E., DEN HERTOG W., 1961. Studies in humic acid chemistry. II. Humic anhydrides. *Fuel*, **40**, 491-502.

WRIGHT J. R., SCHNITZER M., 1961. An estimate of the aromaticity of the organic matter of a podzol soil. *Nature*, **190**, 703-704.

Ann. agron., 1969, **20** (2), 161-181.

ESSAI DE DÉTERMINATIONS QUANTITATIVES RELATIVES A L'ÉVOLUTION DE L'AZOTE DANS UN SOL CULTIVÉ EN ÉQUILIBRE AZOTÉ

R. MOREL

Laboratoire de Recherches de la Chaire de Physico-Chimie et Science du Sol,
École nationale supérieure agronomique, 78 - Grignon
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Différentes relations sont établies entre les quantités mises en jeu dans les mouvements essentiels de l'azote dans un sol en équilibre azoté.

Certaines des valeurs calculées sont confrontées avec des résultats expérimentaux ; diverses applications aux sols cultivés sont données à titre d'exemples.

INTRODUCTION

L'étude de l'évolution de l'azote dans le sol est un problème complexe ; l'azote minéral incorporé dans la couche arable peut être transformé par voie biologique en azote organique ou subir des pertes de nature et d'importance diverses. Simultanément, l'azote organique du sol est progressivement minéralisé, l'azote minéral formé pouvant suivre les mêmes destinées que dans le cas précédent. Il demeure très difficile d'estimer, même approximativement, l'ampleur de ces divers mouvements de l'azote dans un sol. L'utilisation de l'azote 15 permet cependant d'accéder à des informations qui ne sauraient être obtenues avec des méthodes purement chimiques ; par ailleurs, les résultats expérimentaux obtenus sur des sols au laboratoire peuvent difficilement être étendus aux sols en place.

Il paraît alors intéressant de tirer un meilleur parti de renseignements analytiques divers relatifs à l'azote du sol et des récoltes en recherchant par un calcul approprié les différentes quantités mises en jeu dans l'ensemble des processus naturels se produisant dans le sol. Toutefois, dans un problème de ce genre, il est nécessaire d'une part de se limiter aux phénomènes les plus importants, d'autre part de poser

quelques hypothèses qui seront énoncées dans le cours du mémoire ; les résultats obtenus correspondent dès lors à un modèle de sol dans lequel n'interviendraient que les variables essentielles du cas général.

Le problème le plus simple se rapporte à un sol en équilibre azoté, dans lequel le taux d'azote total demeure constant dans le temps. Dans une première partie, nous traiterons théoriquement deux cas, le premier envisageant une seule couche de sol, le second deux couches superposées de taux d'azote organique différents. Le développement des racines est supposé limité aux deux couches de sol étudiées ; chaque couche est perméable, homogène, présentant notamment en tous ses points le même taux d'azote organique.

Dans une seconde partie, nous appliquerons les relations obtenues à un cas précis de sol cultivé en équilibre azoté ; puis, sur des exemples plausibles, nous envisagerons différentes possibilités d'application des méthodes proposées.

Nous donnerons enfin quelques indications sur le cas particulier d'un sol maintenu indéfiniment sans végétation.

CAS D'UNE SEULE COUCHE DE SOL

Représentation des diverses quantités d'azote mises en jeu

Nous diviserons schématiquement l'espace du sol en deux domaines (fig. 1) :

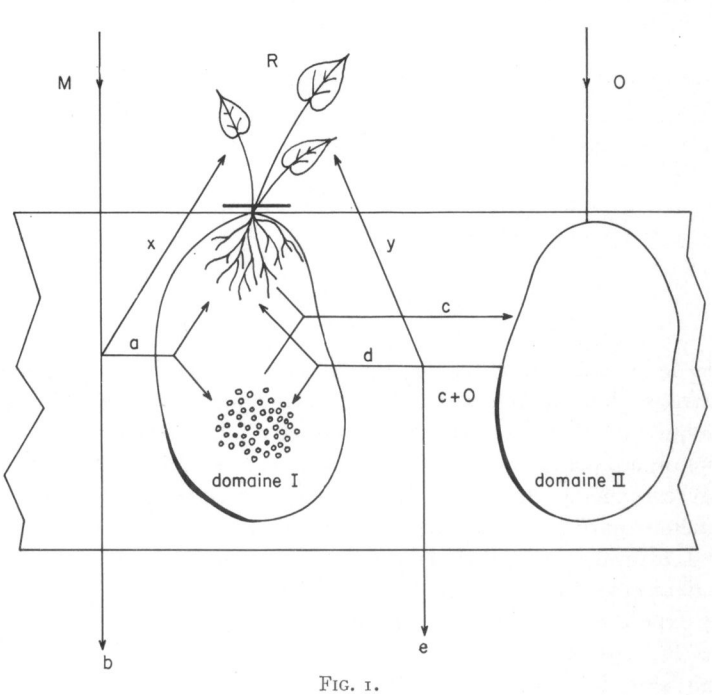


FIG. 1.

a) un domaine I comprenant le monde vivant du sol, dans lequel l'azote minéral se transforme en azote organique de la matière vivante des racines et de la micropopulation qui se développe dans ce domaine.

b) un domaine II représenté par la masse de substance azotée organique non vivante du sol et dans lequel l'azote organique est minéralisé. Cette minéralisation s'effectue principalement grâce à l'activité d'enzymes issues de la matière vivante du domaine I et qui peuvent se trouver partiellement fixées sur la fraction minérale du sol.

Dans la réalité, les deux domaines sont étroitement imbriqués dans un volume de sol qui peut être très petit.

L'unité de surface de sol reçoit au cours d'une unité de temps convenablement choisie et suffisamment longue, l'année moyenne d'une rotation par exemple, les quantités M d'azote minéral et O d'azote organique ; une quantité d'azote R est exportée par la récolte.

La quantité M se distribue :

— en une partie x exportée par la récolte,

— en une partie a alimentant le domaine I et qui se trouve au cours de l'unité de temps incorporée dans les futurs résidus de récoltes et dans la micropopulation du sol,

— en une partie b représentant les pertes (drainage, pertes d'azote gazeux ...).

De même que pour M, la masse d'azote minéralisée $c + O$ se répartit :

— en une quantité y exportée par la récolte,

— en une quantité d qui, conjointement à a, alimente le domaine I et se trouve réorganisée dans les futurs résidus de récolte et dans la micropopulation de ce domaine,

— en une quantité e représentant les pertes.

Relations quantitatives

La quantité d'azote du sol étant constante, la somme des quantités d'azote des domaines I et II doit être constante. Ce comportement survient si chacun des deux domaines considérés séparément demeure en équilibre azoté ou bien si, au cours de l'unité de temps, la perte d'azote de l'un des domaines est compensée dans l'autre domaine par une augmentation d'azote de la même quantité. Dans le premier cas, l'équilibre de l'un des domaines entraîne l'équilibre de l'autre. Au second cas correspond une infinité de possibilités quant à la quantité d'azote de chacun des domaines au terme d'une unité de temps.

Nous nous situerons dans le premier cas et nous supposerons que dans un sol cultivé en équilibre azoté, l'exportation R d'azote par la récolte et la production c d'azote organique de la matière vivante dans le domaine I demeurent respectivement les mêmes par unité de temps.

Il en résulte l'équilibre du domaine II, ce qui implique, notamment, une constance du taux réel de minéralisation de l'azote organique de ce domaine.

Nous considèrerons que les différents mouvements de l'azote définis dans le paragraphe précédent s'effectuent en totalité au cours de l'unité de temps choisie. Ainsi, le domaine I reçoit la quantité $a + d$ d'azote minéral et accroît de c la masse d'azote organique du domaine II ; il en résulte que :

$$c = a + d \qquad (1)$$

Dans le même temps, la quantité $c + O$ minéralisée se répartit comme il a été indiqué, ce qui s'écrit :

$$c + O = y + d + e \qquad (2)$$

Par ailleurs, nous avons, entre les diverses quantités mises en jeu, les relations simples suivantes :

$$M = x + a + b \tag{3}$$

$$R = x + y \tag{4}$$

R représentant la quantité d'azote exportée par la récolte

$$P = b + e \tag{5}$$

P désignant la perte totale d'azote du sol

$$M + O = P + R \tag{6}$$

En résumé, les relations (1), (2) et (6) traduisent respectivement l'état d'équilibre dans le domaine I, dans le domaine II et dans l'ensemble du sol. L'équilibre, pour les domaines I et II réunis, est représenté par l'expression :

$$y + e - a = O \tag{7}$$

déduite de (1) et (2).

La résolution d'un tel système d'équations montre que, pour des valeurs de M, O, R et c constantes, il existe une infinité de solutions. Nous supposerons alors que, pour un sol en équilibre azoté situé dans un complexe climatique et cultural donné, il existe une seule façon de réaliser cet équilibre. Dans ce cas, il devient nécessaire, par rapport au système indéterminé proposé ci-dessus, d'envisager des conditions supplémentaires plausibles, susceptibles de limiter le nombre de solutions. Nous rechercherons ces contraintes dans des arguments de caractère physique et physiologique en proposant l'utilisation des deux hypothèses suivantes :

— les micro-organismes du sol et les cellules radiculaires ne marquent aucune préférence pour l'une ou l'autre des deux sources d'azote minéral (apporté ou minéralisé) ; cette hypothèse est supposée applicable aux pertes ;

— les mouvements de la phase liquide du sol et les phénomènes de diffusion conduisent aussi aisément au voisinage de la surface absorbante de toute cellule vivante les molécules azotées de petites dimensions apportées au sol que celles provenant d'une activité enzymatique ; ce comportement requiert, entre autres conditions, une répartition homogène dans le sol de la matière organique non vivante et de l'azote apporté.

En le précisant, ces hypothèses étendent simultanément aux racines, aux micro-organismes et aux pertes le concept selon lequel, en présence de deux sources différentes d'un élément assimilable, un végétal absorbe cet élément en quantités proportionnelles à celles présentes dans chacune des deux sources (Fried et Dean, 1952).

Appliquées au modèle de sol étudié, les hypothèses énoncées se traduisent par les expressions :

$$\frac{x}{M} = \frac{y}{c + O} \tag{8}$$

$$\frac{a}{M} = \frac{d}{c + O} \tag{9}$$

$$\frac{b}{M} = \frac{e}{c + O} \tag{10}$$

Additionnons membre à membre, il vient :

$$\frac{x + a + b}{M} = \frac{y + d + e}{c + O} \tag{11}$$

relation qui satisfait aux équations (2) et (3).

Dans le système en équilibre étudié, les quantités d'azote absorbées par les plantes et les micro-organismes pendant l'unité de temps sont prélevées dans le même rapport sur l'azote apporté et sur l'azote issu de la minéralisation ; cette observation est également valable pour les pertes.

Dans la recherche d'une représentation plus générale des phénomènes, nous pourrions écrire que les fractions de l'azote minéral apporté M, absorbées respectivement par la récolte, les résidus de récolte et les micro-organismes sont différentes des fractions correspondantes de l'azote minéralisé ($c + O$) ; admettons que ce comportement s'applique aussi aux pertes et désignons par n_1, n_2, n_3, les coefficients de proportionnalité des rapports ci-dessus indiqués ; la proposition énoncée s'écrit :

$$\frac{x}{M} = n_1 \frac{y}{c + O} \tag{12}$$

$$\frac{a}{M} = n_2 \frac{d}{c + O} \tag{13}$$

$$\frac{b}{M} = n_3 \frac{e}{c + O} \tag{14}$$

Additionnons membre à membre :

$$\frac{x + a + b}{M} = \frac{n_1 y + n_2 d + n_3 e}{c + O}$$

Posons $c + O = n_1 y + n_2 d + n_3 e$, équation qui permet de satisfaire à la relation (3). L'utilisation des coefficients n_1, n_2, n_3 dans les relations quantitatives proposées conduirait alors à une solution générale du problème. Malheureusement, l'ignorance des valeurs relatives de n_1, n_2, n_3, élimine cette solution, l'hypothèse avancée (n_1, n_2, $n_3 = 1$) offrant cependant la possibilité de trouver une solution particulière. Dans la mesure où la solution générale apparaîtrait comme une certitude de mieux approcher la réalité, l'écart entre cette solution et la solution particulière étudiée reflèterait le degré d'approximation des hypothèses envisagées dans ce mémoire.

En utilisant les relations (8), (9) et (10) combinées avec les expressions (1), (4) et (6), les valeurs de c, y, a, d, b et e sont aisément calculées en fonction des quantités connues ou susceptibles de déterminations : M, O, R et x, x pouvant être estimé par voie isotopique. Plus simplement encore, les relations trouvées s'écrivent en fonction de M, O et $\rho = \frac{x}{R}$, ρ représentant la fraction de l'azote de la récolte provenant de l'azote minéral apporté au sol ($0 < \rho < 1$).

Les expressions définitives obtenues sont les suivantes :

$$a = M - \rho(M + O) \tag{15}$$

$$c = \frac{1}{\rho}[M - \rho(M + O)] \tag{16}$$

$$d = \frac{(1 - \rho)}{\rho}[M - \rho(M + O)] \tag{17}$$

$$b = \rho(M + O - R) \tag{18}$$

$$e = (1 - \rho)(M + O - R) \tag{19}$$

Remarques.

a) Le rapport ρ est lié aux grandeurs explicitées ci-dessus par les relations :

$$\rho = \frac{M - a}{M + O} = \frac{M}{M + O + c} = \frac{b}{P} = 1 - \frac{e}{P} = \frac{a}{c} \tag{20}$$

b) L'expression $\rho = \frac{a}{c} = \frac{x}{R} = \frac{x + a}{R + c}$ montre que les fractions respectives de l'azote du domaine I et de la récolte prélevées sur l'azote minéral apporté sont les mêmes. D'une façon plus générale, dans le complexe sol-plante, ρ exprime la fraction de l'azote de tous les organismes vivants provenant de l'azote minéral apporté.

Taux de minéralisation de l'azote organique du sol

Le stock d'azote organique du sol peut, sans erreur importante, être représenté sous un climat tempéré par la masse totale N d'azote organique du domaine II. Dans le système étudié, cette masse est constante : au cours de l'unité de temps, l'année par exemple, la quantité d'azote minéralisée $c + O$ est, en effet, remplacée par une quantité équivalente en provenance du domaine I et de l'apport d'azote organique au sol.

Le taux de minéralisation réel de l'azote est donné par l'expression :

$$\alpha = \frac{c + O}{N} = \frac{(1 - \rho)}{\rho}\frac{M}{N} \tag{21}$$

La fraction de $c + O$ qui se réorganise annuellement dans le sol est d ; si β exprime le taux annuel de réorganisation par rapport à N, nous avons :

$$\beta = \frac{d}{N} = \frac{(1 - \rho)}{\rho N}[M - \rho(M + O)] \tag{22}$$

Si nous appelons la valeur $\gamma = \alpha - \beta$ le taux de minéralisation net annuel de l'azote , nous obtenons :

$$\gamma = (1 - \rho)\frac{(M + O)}{N} \tag{23}$$

Quantité d'azote organique du sol

Cette quantité peut être directement déduite des relations (21) ou (23) en fonction, notamment, de ρ et de l'un des taux de minéralisation. Mais elle s'exprime aussi

de façon simple, après élimination de ρ, en fonction des quantités d'azote apportées et des deux taux de minéralisation :

$$N = \frac{M + O}{\gamma} - \frac{M}{\alpha} = \frac{O}{\gamma} + \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\alpha}\right) M \qquad (24)$$

La seconde forme de cette relation précise la quantité dont l'introduction d'azote minéral majore le terme $\frac{O}{\gamma}$ relatif à l'azote organique apporté dans l'expression de la masse N d'azote organique total du sol.

Cas particulier : l'apport d'azote organique au sol est nul

Le sol reçoit, dans ce cas, une fumure exclusivement minérale. Les diverses quantités d'azote mises en jeu sont alors représentées par les expressions calculées précédemment et dans lesquelles la valeur de O est nulle (1). Remarquons alors que le rapport des taux de minéralisation $\frac{\gamma}{\alpha}$ devient égal à ρ.

Quantité d'azote organisée par la micropopulation du sol

Si r et m représentent les quantités d'azote organisées respectivement par unité de temps dans les racines et la micropopulation du sol, nous avons :

$$r + m = c \qquad \text{et} \qquad m = c - r \qquad (25)$$

La quantité m d'azote est utilisée par les générations de micro-organismes qui se succèdent au cours de l'unité de temps dans le sol (domaine I).

Quantité d'azote minéral présente dans le sol à un instant donné

Dans les conditions naturelles, l'azote minéral apporté au sol ou issu de la minéralisation n'est pas instantanément incorporé dans la récolte, le domaine I ou éliminé dans les pertes. Un certain temps de latence existe, qui varie probablement dans de très larges limites avec chaque molécule azotée considérée individuellement ; ce temps peut être en effet pratiquement nul ou bien plus ou moins important. A un instant donné, l'ensemble de toutes ces molécules en attente représente la quantité d'azote minéral du sol à cet instant, dont une partie peut temporairement se trouver retenue par le complexe absorbant.

CAS DE DEUX COUCHES DE SOL DE TAUX D'AZOTE ORGANIQUE DIFFÉRENTS

Représentation des diverses quantités d'azote mises en jeu

Chacune des deux couches (couche superficielle et couche profonde) comprend les domaines I et II dont la signification a été précisée dans le cas d'une seule couche de sol.

La figure 2 représente les divers mouvements de l'azote dans les deux couches ; les indices 1 et 2 affectent les symboles utilisés pour désigner les quantités d'azote mises respectivement en jeu dans la première et la seconde couche.

Le domaine II de la première couche reçoit seul l'apport O d'azote organique. La couche profonde est approvisionnée en azote minéral de la quantité $P_1 = b_1 + e_1$

(1) Il faudrait, en réalité, tenir compte de la quantité d'azote fixée par voie biologique ; celle-ci est généralement faible par rapport à la quantité d'azote apportée au sol lorsque les récoltes ne sont pas des légumineuses.

perdue par drainage de la première couche (dans le second cas, les pertes de la première couche ne comprennent que les pertes par drainage).

La présence de deux systèmes superposés, présentant en commun le fait d'alimenter le même végétal, implique la nécessité d'introduire un paramètre caractérisant cette particularité ; nous supposerons que la couche superficielle et la couche profonde fournissent respectivement les fractions kR et $(1 - k)$R de la quantité

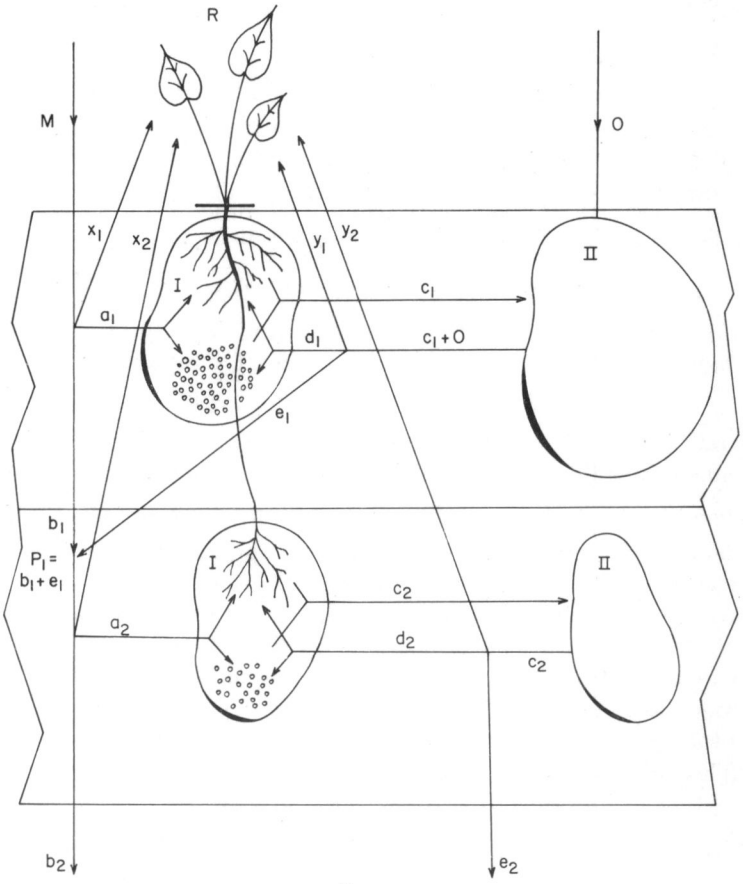


FIG. 2

totale R d'azote exportée par la récolte ; k représente un coefficient compris entre 0 et 1. Si x et y désignent les fractions de R prélevées sur l'azote minéral reçu et sur l'azote minéralisé ($R = x + y$), nous admettrons que :

$$x_1 = kx \tag{26}$$

$$x_2 = (1 - k)x \tag{27}$$

$$y_1 = ky \tag{28}$$

$$y_2 = (1 - k)y \tag{29}$$

Comme dans le premier cas, nous ferons les mêmes hypothèses relatives aux fractions de l'azote apporté et minéralisé prises respectivement par la récolte, les résidus de récolte et les micro-organismes, ou éliminés dans les pertes. Nous consi-

dèrerons de plus, en première approximation, que l'azote organique ne peut passer sous cette forme du domaine II de la première couche au domaine II de la seconde couche.

Les diverses quantités d'azote mises en jeu dans les deux couches de sol se calculent aisément (voir appendice). Il en est de même pour les taux de minéralisation de l'azote organique et les quantités d'azote organique total du sol exprimées en fonction des taux de minéralisation . Notons enfin pour ce système à deux couches superposées la particularité suivante : la fraction de l'azote du domaine I prélevée sur l'azote minéral apporté n'est pas la même pour la couche superficielle et pour la couche profonde ; pour la première, cette fraction est égale à :

$$\frac{a_1}{c_1} = \rho$$

pour la seconde, elle a pour valeur :

$$a_2 \frac{b_1}{b_1 + e_1} \frac{1}{c_2} = \rho^2 \qquad \text{avec} \qquad \rho^2 < \rho \tag{30}$$

Si le sol reçoit une fumure exclusivement minérale, les quantités d'azote mises en jeu sont représentées par les expressions calculées dans lesquelles la valeur de O est nulle.

APPLICATION DES RÉSULTATS

Application à un cas concret : sol en équilibre azoté recevant une fumure exclusivement minérale

Nous appliquerons les résultats obtenus à l'un des essais de longue durée du champ d'expériences de la Station agronomique de Grignon. Il s'agit de parcelles cultivées (blé, plante sarclée), fertilisées depuis 1902 avec une fumure exclusivement minérale (MOREL et coll., 1956) ; les pailles de céréale et les verts de plante sarclée sont enlevés après la récolte. Le sol de ces parcelles présente depuis 1952 le même taux d'azote total : 1,38 p. 1000 pour la couche arable, 0,92 p. 1 000 pour le sous-sol. L'équilibre azoté paraît atteint (MOREL, 1968).

Les parcelles reçoivent, depuis 1902, 0,87 kg d'azote minéral par are et par an. Tenant compte des apports par les pluies et de la fixation biologique non symbiotique, nous estimerons à 1 kilogramme la quantité d'azote incorporée annuellement au sol ; arbitrairement, nous admettrons que les quantités d'azote en provenance des pluies et de la fixation biologique sont respectivement de 0,07 et 0,06 kg, cette dernière quantité devant être considérée comme un apport d'azote organique.

Nous évaluerons les exportations moyennes d'azote par les récoltes à 0,85 kg par are et par an.

Le taux net de minéralisation γ_1 a été expérimentalement estimé à 1,25 p. 100 par an pour la couche arable (MOREL, 1968). Connaissant ce taux, la fraction ρ de l'azote des récoltes provenant de l'azote minéral reçu par le sol peut être déduite de la relation (54) : ρ est alors égal à 0,48.

Nous ne connaissons pas le coefficient k, fraction de l'azote prélevée par la récolte dans la seule couche arable ; nous envisagerons deux valeurs possibles : 1/2 et 2/3.

Le taux réel de minéralisation calculé pour la couche arable est de 2,43 p. 100 par an ; pour le sous-sol, les taux net et réel de minéralisation sont respectivement égaux à 1,07 et 2,23 p. 100 ($k = 1/2$) ; à 0,81 et 1,68 p. 100 ($k = 2/3$). Remarquons que la connaissance expérimentale de γ_2 permettrait, d'après la relation (66), de calculer le coefficient k.

Le tableau I indique, en kilogrammes par hectare et par an, l'importance des principaux mouvements de l'azote du sol et du sous-sol pour les deux valeurs de k choisies. La figure 3 explicite, avec les mêmes unités, les quantités d'azote mises en jeu pour $k = 2/3$.

TABLEAU I

	$k = 1/2$			$k = 2/3$		
	Couche arable	Sous-sol	Total pour les 2 couches	Couche arable	Sous-sol	Total pour les 2 couches
Azote apporté au sol : minéral	94*			94		
organique	6			6		
Azote organisé dans le sol provenant de l'azote minéral apporté	46	14	60	46	11	57
Azote de la récolte provenant de l'azote minéral apporté	20	10	30	27	7	34
Azote minéralisé	102	62	164	101	46	147
Azote de la récolte provenant de l'azote minéralisé	33	22	55	36	15	51
Azote réorganisé	50	32	82	49	24	73

* Les quantités indiquées sont exprimées en kilogrammes d'azote par hectare et par an.

Si la quantité r d'azote des racines de la couche arable a pour valeur approximative 20 kilogrammes par hectare et par an, la masse m d'azote organisée annuellement par la micropopulation du sol est de l'ordre de 75 kilogrammes pour la couche considérée.

Les remarques suivantes permettent de porter un jugement, sans aucun doute très partiel, sur la validité des résultats obtenus dans le cas des parcelles étudiées :

— La plante utilise de façon directe 36 p. 100 de l'azote minéral apporté par les engrais et les pluies ($kg = 2/3$), valeur qui paraît acceptable ;

— la fraction a_1 de l'azote minéral apporté qui se transforme dans la couche arable en azote organique est trouvée égale à 46 kilogrammes ; l'estimation expérimentale est de l'ordre de 50 kilogrammes.

Ainsi, les relations établies dans la première partie de ce mémoire semblent pouvoir rendre compte de façon assez satisfaisante des résultats obtenus sur des parcelles expérimentales en équilibre azoté.

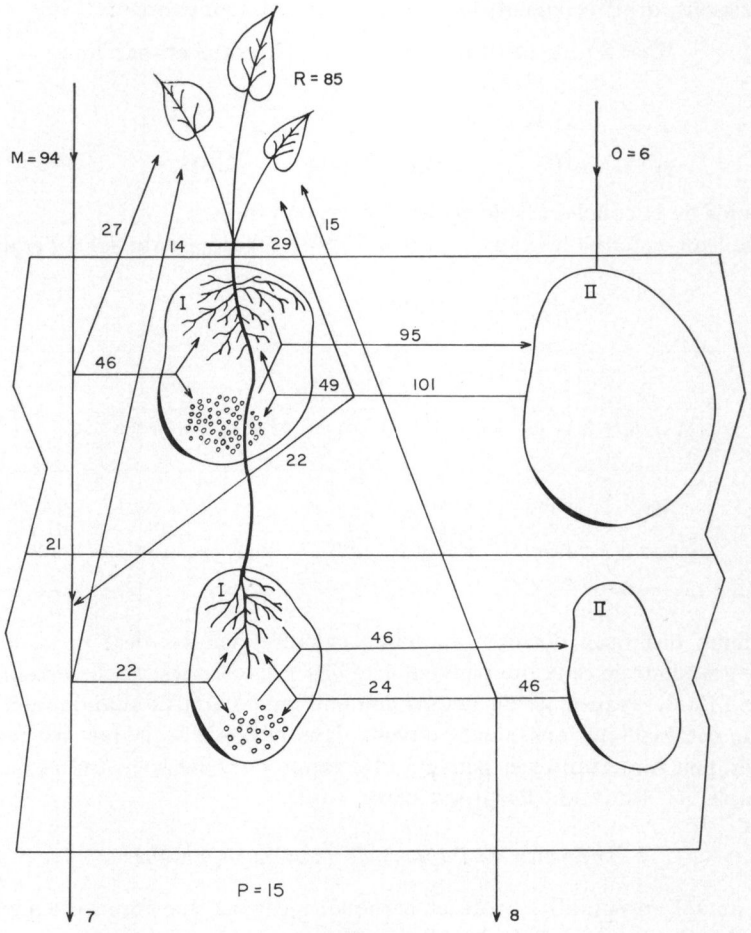


FIG. 3.

Toutefois, des essais effectués avec ^{15}N permettraient d'accéder de façon directe à la valeur de ρ et de juger avec plus de certitude de la validité des raisonnements et hypothèses proposés.

Taux d'azote organique de sols à minéralisation variée recevant une fumure exclusivement minérale

Dans un complexe pédo-climatique et cultural donné, les taux de minéralisation net et réel du sol tendent vers des valeurs fixes atteintes lorsque l'équilibre azoté est établi. Les relations (23), (54) et (66) montrent que la quantité d'azote organique du sol, à l'équilibre, peut s'exprimer de façon simple en fonction de M, O, ρ, , R, k et du taux net de minéralisation.

Calculons, à titre d'exemple, les taux p. 1 000 d'azote organique de la couche arable d'un sol à l'équilibre recevant une fumure exclusivement minérale ; nous supposerons que toutes les pailles et fanes de récoltes sont enlevées, ce qui signifie que la quantité O est pratiquement nulle.

Choisissons, arbitrairement, les valeurs plausibles suivantes :

$M = 80$ et 120 kilogrammes par hectare et par an

$\rho = 0{,}4 \quad 0{,}5 \quad 0{,}6$

$k = 2/3$

$\gamma_1 = 0{,}010 \quad 0{,}015 \quad 0{,}020 \quad 0{,}025$

Le poids de la couche arable est estimé à 3 000 tonnes.

Le tableau 2 donne les taux p. 1 000 d'azote organique du sol à l'équilibre :

TABLEAU 2

Valeurs de ρ	$\gamma_1 = 0{,}01$		$\gamma_1 = 0{,}015$		$\gamma_1 = 0{,}020$		$\gamma_1 = 0{,}025$	
	$M = 80$	$M = 120$	$M = 80$	$M = 120$	$M = 80$	$M = 120$	$M = 80$	$M = 120$
0,4	1,60	2,40	1,07	1,60	0,80	1,20	0,64	0,96
0,5	1,33	2,0	0,89	1,33	0,67	1,0	0,53	0,80
0,6	1,07	1,60	0,71	1,07	0,53	0,80	0,43	0,64

Plusieurs des taux d'azote organique calculés, voisins de 1 p. 1 000, sont de l'ordre de grandeur de ceux qui peuvent être observés dans les sols de certaines exploitations de l'Ile-de-France, ayant depuis de nombreuses années abandonné l'élevage ; les sols de ces exploitations n'ont souvent dans le passé reçu que des restitutions organiques peu importantes et peuvent être rapprochés des sols étudiés dans le présent exemple (G. BARBIER, R. GUENNELON, 1951).

Influence de l'apport de matière organique

Soit un sol en équilibre azoté et carboné, recevant une fumure exclusivement minérale. Appliquons lui une fumure organique supplémentaire et cherchons à définir quantitativement le nouvel état d'équilibre.

Les relations proposées ne font apparaître aucune distinction entre l'azote apporté sous forme minérale et l'azote incorporé sous forme organique. Cette observation vaut en particulier pour les relations (24), (56) et (68) qui expriment la quantité d'azote organique totale du sol. Il semblerait donc que celle-ci soit indépendante de la « nature » de l'azote apporté.

Cependant, ces relations montrent que la quantité N d'azote organique total, à l'équilibre, dépend, non seulement des apports (M, O), mais aussi des taux de minéralisation.

L'introduction de matière organique au sol peut abaisser notablement la valeur de γ du fait de l'accroissement des processus de réorganisation favorisés par l'apport de substances carbonées. Nous ne pouvons, par contre, préjuger de l'influence de la matière organique sur le taux réel de minéralisation α.

Si nous nous référons à la relation (24), nous constatons que l'apport O et la diminution de γ jouent dans le sens d'une augmentation de N ; cette augmentation peut être accentuée ou atténuée selon que α s'accroît ou diminue par l'introduction de

matière organique ; si nous supposons que α varie peu, la quantité d'azote organique du sol doit augmenter.

Ainsi, un apport organique au sol agit-il, non seulement par l'azote supplémentaire incorporé, mais aussi par l'incidence du carbone présent sur les taux de minéralisation.

Nous pouvons aussi déduire des considérations précédentes l'influence de l'apport organique sur la valeur de ρ ; la relation (34) montre qu'un tel apport modifie cette valeur dans le sens probable d'une diminution.

Les raisonnements précédents ont pour but de tenter une analyse de l'action de la matière organique et, par là, de prévoir les conséquences d'un apport de celle-ci au sol. Toutefois, dans la réalité, les valeurs de N et de ρ ne sont pas le résultat d'un calcul, mais font l'objet de déterminations analytiques ; les taux de minéralisation, ainsi que toutes les quantités mises en jeu dans les deux équilibres considérés, sont alors déduits par les relations proposées.

Nous donnons néanmoins ci-après un exemple dans lequel nous nous rapportons aux raisonnements précédents pour choisir la valeur de ρ.

Comparons deux sols que, par souci de simplification, nous admettrons cultivés exclusivement en céréales. Dans un premier cas, les pailles sont éliminées ; dans un second cas, elles sont enfouies après les récoltes, ce qui correspond à un apport annuel de matière organique (O) ; nous supposerons que, dans le second cas, les quantités récoltées sont de 10 p. 100 supérieures aux quantités récoltées dans le premier cas.

Les grandeurs M, O et R sont choisies parmi les valeurs courantes ; k est admis égal à 2/3. En ce qui concerne ρ, nous supposerons ce rapport égal à 0,50 dans le premier cas. Dans le second cas, nous considérerons que α est le même que dans le premier équilibre ; ρ doit alors être plus petit et, d'après un calcul simple (relation 49), inférieur à 0,47 ; nous le choisirons égal à 0,44. Enfin, nous fixerons à 1,3 p. 1 000 le taux d'azote organique de la couche arable évaluée à 3 000 tonnes.

Les tableaux 3 et 4 précisent les données et expriment les résultats correspon-

TABLEAU 3

	1er cas	2e cas
Productivité annuelle moyenne { grain	4 000*	4 400
Productivité annuelle moyenne { paille	4 000	4 400
Azote minéral apporté au sol (M)	100	100
Azote organique apporté au sol (O)	0	18
Azote de la récolte :		
grain (environ 1,6 p. 100 de la matière sèche)	65	72
paille (environ 0,4 p. 100 de la matière sèche)	16	18
Exportation par la récolte	81	90

* Les quantités sont exprimées en kilogrammes par hectare et par an.

dants aux deux cas envisagés. Ajoutons que, dans les conditions indiquées, l'enfouissement des pailles a pour effet d'élever le taux d'azote organique du sol de 1,3 à 1,65 p. 1 000.

TABLEAU 4

Couche arable			Sous-sol		
	1er cas	2e cas		1er cas	2e cas
x_1	27*	26,4	x_2	13,5	13,2
y_1	27	33,6	y_2	13,5	16,8
a_1	50	48,1	a_2	23	32,5
c_1	100	109,3	c_2	46	73,8
d_1	50	61,2	d_2	23	41,3
b_1	23	25,5	b_2	9,5	12,3
e_1	23	32,5	e_2	9,5	15,7

* Les quantités sont exprimées en kilogrammes par hectare et par an.

Cas d'un sol recevant une fumure exclusivement organique

La quantité M d'azote minéral apportée au sol est réduite aux seuls apports d'azote minéral par les pluies. Nous négligerons la quantité d'azote de l'air fixée par le sol par voie biologique et que nous devrions ajouter à l'apport O d'azote organique.

Le rapport $\rho = \frac{b}{p} = \frac{M}{M + O + c}$ est dans ce cas très petit.

Exemple : Soit un sol en équilibre azoté situé dans une région à pluviométrie modérée, et contenant 2 p. 1 000 d'azote organique. Nous supposerons deux cas se différenciant uniquement par la valeur de ρ et correspondant aux données ci-après ; les quantités sont exprimées pour un hectare et par an.

$$M = 10$$
$$O = 75$$
$$R = 60$$
$$k = 2/3$$
$$\rho = 0{,}05 \quad \text{et} \quad 0{,}10$$

Les diverses quantités d'azote mises annuellement en jeu dans la couche arable, évaluée à 3 000 tonnes, sont les suivantes :

	1er cas $\rho = 0{,}05$ (kg)	2e cas $\rho = 0{,}10$ (kg)
x_1	2	4
y_1	38	36
a_1	5,8	1,5
c_1	115	15
d_1	109,2	13,5
b_1	2,2	4,5

e_1	42,8	40,5
α_1	0,032	0,015
γ_1	0,0135	0,0127

Les deux valeurs de ρ, choisies très distinctes, conduisent à des résultats fort différents, notamment en ce qui concerne les quantités d'azote réorganisées (d_1).

Dans le premier cas, celles-ci sont élevées, ce qui est en accord avec le raisonnement développé dans l'exemple précédent ; les transferts d'azote au sein même de la couche arable sont intenses.

L'ampleur des processus de réorganisation s'observe également par la différence qui existe entre les taux net et réel de minéralisation.

Dans le second cas, au contraire, d_1 est peu important, ce qui paraît en contradiction avec l'effet favorable du carbone sur la prolifération microbienne. Notons toutefois que dans les deux cas les taux nets de minéralisation sont voisins.

Cas particulier d'un sol maintenu indéfiniment sans végétation

La figure 4 reproduit, dans ce cas, les divers mouvements de l'azote pour une seule couche de sol. Des relations homologues à celles écrites pour un sol cultivé peuvent être établies, faisant appel aux mêmes hypothèses.

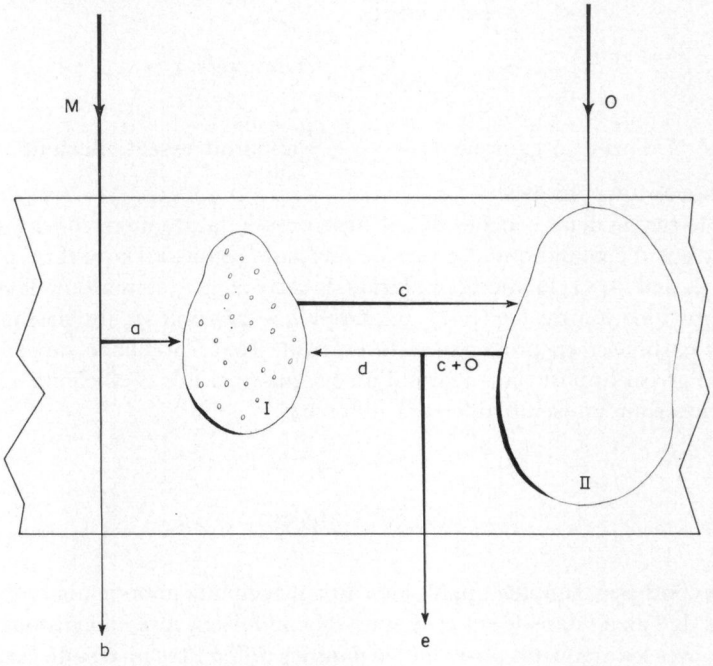


FIG. 4.

Toutefois R et le coefficient ρ n'existent pas ; nous remplacerons ρ par $\sigma = \frac{a}{c}$, fraction de l'azote de la micropopulation prélevée sur la quantité M d'azote minéral apportée. Remarquons que la détermination de σ doit soulever des difficultés beaucoup plus grandes que l'évaluation de ρ.

Les relations calculées sont identiques à celles correspondant à un sol cultivé, mais dans lesquelles R ne figure pas, tandis que ρ est remplacé par σ.

Exemples :

$$c = \frac{1}{\sigma}[M - \sigma(M + O)]$$

$$e = (1 - \sigma)(M + O)$$

$$\gamma = (1 - \sigma)\frac{(M + O)}{N}$$

La relation (24), exprimant la quantité d'azote de la couche de sol en fonction des taux de minéralisation, est également valable.

Le cas se rapportant à un apport nul d'azote organique suggère quelques commentaires. Dans un sol cultivé, la masse de substances carbonées apportées par les racines apparaît suffisante pour maintenir une micropopulation abondante. Dans un sol maintenu sans aucune végétation, l'origine du carbone, à l'équilibre, réside dans la seule activité des organismes autotrophes autres que les plantes. Il est probable que la micropopulation, y compris les fixateurs d'azote, ne puisse alors connaître un développement important :

c est faible ;

$$\sigma = \frac{M}{M + O + c} \text{ tend vers } 1 ;$$

la quantité N d'azote organique $N = \frac{c + O}{\alpha}$ apparaît essentiellement fonction des biosynthèses autotrophiques.

Dans le cas de deux couches de sol superposées, la première couche se comporte comme il vient d'être indiqué. La couche profonde reçoit, à l'équilibre, une quantité d'azote égale à $M + O$; la micropopulation de cette couche connaît un développement qui demeure fonction de l'activité autotrophique possible et du passage direct de substances carbonées en provenance du domaine II de la couche superficielle (nous avions négligé cet apport dans le cas d'un sol cultivé). Les coefficients σ relatifs aux deux couches sont vraisemblablement différents.

CONCLUSIONS

Des hypothèses simples appliquées aux principaux mouvements caractérisant l'évolution de l'azote dans le sol et le sous-sol conduisent aux conclusions suivantes :

— Toutes les quantités mises en jeu dans les différentes phases de cette évolution peuvent s'exprimer aisément en fonction des données ci-après :

M et O représentant respectivement les quantités d'azote minéral et organique apportées au sol au cours de l'unité de temps choisie (une année moyenne de rotation, par exemple),

R et ρ exprimant respectivement la quantité d'azote de la récolte et la fraction de cet azote prélevée sur l'azote minéral reçu par le sol,

k indiquant la proportion de l'azote prélevée dans la seule couche arable.

— Connaissant les quantités totales d'azote organique du sol et du sous-sol, il est aisé d'en calculer les taux de minéralisation (réel et net) pendant l'unité de temps considérée (relations 21, 23, 53, 54, 65 et 66).

— Des relations sont établies entre la quantité totale d'azote organique du sol et du sous-sol et les facteurs qui entrent en jeu dans l'état d'équilibre considéré. Ces facteurs sont :

la quantité d'azote apportée au sol (minéral et organique),

les taux de minéralisation (réel et net) et, pour le sous-sol,

la quantité R et le coefficient k définis ci-dessus.

Certains de ces facteurs sont interdépendants ; un apport de substance organique notamment peut, du fait de la présence de carbone, modifier les valeurs des taux de minéralisation : la « nature » de l'azote incorporé au sol devient indirectement un facteur de variation de la quantité totale d'azote organique ; les expressions établies permettent d'expliciter cette influence.

— L'utilisation des relations proposées, dans le cas précis d'un sol en équilibre azoté, semble rendre compte de façon satisfaisante des résultats expérimentaux observés.

Sur des exemples plausibles concernant des sols soumis à des conditions culturales variées, il est montré dans quelle mesure ces relations peuvent donner des informations quantitatives complémentaires concernant les principaux transferts de l'azote dans le sol. Le cas d'un sol maintenu sans végétation est abordé.

— Les problèmes traités sont limités aux cas de sols cultivés en équilibre azoté. Toutefois, les grandeurs relatives à des sols voisins de cet état ne doivent pas être très différentes de celles qui seraient calculées pour une situation d'équilibre.

— Il ne fait aucun doute que les hypothèses utilisées dans ce mémoire sont discutables. Leur objet est de permettre de proposer des ordres de grandeurs quant aux quantités mises en jeu dans chacune des phases essentielles de l'évolution de l'azote du sol. Ces quantités ne sont généralement pas accessibles à une expérience directe ; aussi paraissait-il souhaitable de les rechercher par une utilisation plus complète des informations susceptibles d'être recueillies par les méthodes actuelles d'investigation.

Reçu pour publication en janvier 1969.

REMERCIEMENTS

J'exprime mes très vifs remerciements à Messieurs Barbier, Hébert, Hénin, Lefèvre et Rémy, dont les observations m'ont été précieuses et avec lesquels j'ai pu avoir de nombreux échanges de vue.

SUMMARY

TRIAL OF QUANTITATIVE DETERMINATIONS RELATING TO NITROGEN EVOLUTION IN A SOIL CULTIVATED IN NITROGENOUS BALANCE

The quantities involved in the main motions of the nitrogen of a soil in balance are calculated refering to the following considerations :

The space of the soil is divided in two domains : the former included the whole of the living organisms of the soil (roots, micro-population) ; the latter is represented by the organic nitrogen mass not living and progressively mineralized. This division suggests a first group of relations set up between the additions (mineral and organic), the losses (crops, drainage) and the nitrogen motion between the two domains. A second group of relations is deduced from the following hypotheses : neither the plant nor the microorganism make a distinction between the brought nitrogen and the nitrogen from the mineralization, this behaviour being equally extended to the losses by drainage.

The whole of the relations set up in this manner offers the possibility to calculate easily the searched expressions concerning the width of the different nitrogen motions in the soil. In other respects, the net and real mineralization rates are both explicited ; the entire organic nitrogen quantity is bound to the brought quantities and to the two mineralization rates, which allows to specify the influence of the « nature » of the nitrogen incorporated to the soil (mineral and organic).

Applied to concrete case of a soil in nitrogenous balance, the proposed expressions seem to be able to account in a satisfying manner for the experimental results observed.

ZUSAMMENFASSUNG

QUANTITATIVER BESTIMMUNGSVERSUCH ÜBER DIE EVOLUTION DES STICKSTOFFS IN EINEM KULTIVIERTEN BODEN MIT STICKSTOFFGLEICHGEWICHT

Die bei den hauptsächlichen Bewegungen des im Gleichgewichtszustand befindlichen Bodenstickstoffes auftretenden Mengen, werden laut nachfolgender Betrachtungen berechnet :

Der Bodenraum wird in zwei Gebiete aufgeteilt : eines umfasst die gesamten lebenden Organismen des Bodens (Wurzeln, Mikropopulation) ; das andere die nicht lebendige, organische und progressiv mineralisierte Sickstoffmasse. Diese Aufteilung ergibt eine erste Gruppe von bestehenden Beziehungen zwischen den (mineralischen und organischen) Zugaben, den Verlusten (Ernten, Dränierungen) und den Bewegungen des Stickstoffs zwischen den beiden Gebieten. Eine zweite Gruppe von Beziehungen geht von der folgenden Hypothese aus : weder die Pflanze, noch der Mikroorganismus macht einen Unterschied zwischen dem zugeführten und dem aus der Mineralisierung entstehenden Srtickstoff. Dieses Verhalten gilt auch für die durch Dränieru ng verursachten Verluste.

Die Gesamtheit der auf diese Weise geschaffenen Beziehungen bietet die Möglichkeit, die gesuchten Ausdrücke hinsichtlich des Umfanges der verschiedenen Stickstoffbewegungen im Boden leicht zu berechnen. Ausserdem, werden die netto- und tatsächlichen- Mineralisierungsraten genau bestimmt ; die gesamte organische Stickstoffmenge des Bodens steht in Beziehung mit den zugebrachten Mengen und mit den beiden Mineraliesierungsraten, was die Bestimmung des Einflusses der « Natur » des Boden-Stickstoffs (mineralischenund organischen) ermöglicht.

Angewandt auf einen konkreten Fall eines im Stickstoffgleichgewicht befindlichen Bodens, scheinen die vorgeschlagenen Ausdrücke in der Lage zu sein, die beobachteten, experimentellen Ergebnisse in befrliedigender Weise wiederzugeben.

РЕЗЮМЕ

Опыт количественного определения эволюций азота в окультуренной почве находящейся в состоянии азотного равновесия.

Р. МОРЭЛЬ.

Автор определял количества азота мобилизованные уравновешенной почвой, во время главных передвижений азота, исходя из следующих соображений :

Почвенное пространство можно разделить на две области : первая заключает всю совокупность живых организмов почвы (корни, микронаселение), вторая-представлена прогрессивно минерализующейся неживой массой органического азота. Такое подразделение может уже дать представление о первом виде отношений существующих между внесением (минеральная и органическая формы), потерями (урожаи, дренаж), и перемещениями азота из одной области к другой. Вторая группа отношений вытекает из следующей гипотезы : для растений и для микроорганизмов не существует никакого различия между азотом внесенным и азотом минерализованным; также растения и микроорганизмы ведут себя по отношению к потерям вызванным дренажем.

Совокупность установленных таким образом отношений дает сравнительно легкую возможность вычислить необходимые выражения размаха различных движений азота в почве. Выявляются также чистый теоритический, и реальный проценты азота минерализованного; общее количество органического азота почвы сравнивается со внесенными количествами этого элемента и с двумя процентными соотношениями найденными для минерализации, что позволяет уточнить влияние « природы » включенного в почву азота (минеральный, или органический).

Примененные к конкретному примеру почвы находящейся в состоянии азотного равновесия, предлагаемые формулы дают как-будто довольно удовлетворительный отчет о полученных в данном эксперименте результатах.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARBIER G., GUENNELON R., 1961. Variation actuelle de l'humus dans des fermes sans fumier. *C. R. Acad. agric. Fr.*, **37**, 119-123.

FRIED M., DEAN L. A., 1952. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Sci.*, **73**, 273-271.

MOREL R., RICHER A., MASSON P., 1956. Étude expérimentale de la variation du taux de matière organique du sol dans le champ d'expériences de la Station agronomique de Grignon. *Ann. agron.*, Série A, 183-204.

MOREL R., 1968. Évolution de l'azote et du carbone organiques du sol au cours d'une expérience de longue durée. *Ann. agron.*, **19**, 153-174.

APPENDICE

1. *Relations complémentaires relatives au cas d'une seule couche de sol*

$$\frac{d}{c} = 1 - \rho \tag{31}$$

$$\frac{d}{c + O} = 1 - \rho \frac{(M + O)}{M} \tag{32}$$

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \rho \frac{(M + O)}{M} \tag{33}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{\alpha} \frac{M}{(M + O)} \tag{34}$$

2. *Relations générales relatives au cas de deux couches de sol superposées*

1re couche (couche arable)

$$M = x_1 + a_1 + b_1 \tag{35}$$

$$c_1 = a_1 + d_1 \tag{36}$$

$$c_1 + O = y_1 + d_1 + e_1 \tag{37}$$

$$M + O = kR + P_1 \tag{38}$$

$$P_1 = b_1 + e_1 \tag{39}$$

2e couche (sous-sol)

$$P_1 = x_2 + a_2 + b_2 \tag{40}$$

$$c_2 = a_2 + d_2 \tag{41}$$

$$c_2 = y_2 + d_2 + e_2 \tag{42}$$

$$P_2 = b_2 + e_2 \tag{43}$$

Ensemble des deux couches

$$M + O = R + P_2 \tag{44}$$

3. *Quantités mises en jeu dans le cas de deux couches de sol superposées*

1re couche (couche arable)

$$x_1 = \rho k R \tag{45}$$

$$y_1 = (1 - \rho) k R \tag{46}$$

$$a_1 = M - \rho(M + O) \tag{47}$$

$$c_1 = \frac{1}{\rho}[M - \rho(M + O)] \tag{48}$$

$$d_1 = \frac{(1 - \rho)}{\rho}[M - \rho(M + O)] \tag{49}$$

$$b_1 = \rho(M + O - kR) \tag{50}$$

$$e_1 = (1 - \rho)(M + O - kR) \tag{51}$$

$$\frac{d_1}{c_1 + O} = 1 - \rho \frac{(M + O)}{N_1} \tag{52}$$

$$\alpha_1 = \frac{(1 - \rho)}{\rho} \frac{M}{N_1} \tag{53}$$

$$\gamma_1 = (1 - \rho) \frac{(M + O)}{N_1} \tag{54}$$

$$\frac{\gamma_1}{\alpha_1} = \rho \frac{(M + O)}{M} \tag{55}$$

$$N_1 = \frac{M + O}{\gamma_1} - \frac{M}{\alpha_1} \tag{56}$$

2e couche (sous-sol)

$$x_2 = \rho(1 - k) R \tag{57}$$

$$y_2 = (1 - \rho)(1 - k) R \tag{58}$$

$$a_2 = (1 - \rho)(M + O - kR) \tag{59}$$

$$c_2 = \frac{(1 - \rho)}{\rho}(M + O - kR) \tag{60}$$

$$d_2 = \frac{(1 - \rho)^2}{\rho}(M + O - kR) \tag{61}$$

$$b_2 = \rho(M + O - R) \tag{62}$$

$$e_2 = (1 - \rho)(M + O - R) \tag{63}$$

$$\frac{d_2}{c_2} = 1 - \rho \tag{64}$$

$$\alpha_2 = \frac{(1 - \rho)}{\rho}\frac{(M + O - kR)}{N_2} \tag{65}$$

$$\gamma_2 = (1 - \rho)\frac{(M + O - kR)}{N_2} \tag{66}$$

$$\frac{\gamma_2}{\alpha_2} = \rho \tag{67}$$

$$N_2 = \left(\frac{1}{\gamma_2} - \frac{1}{\alpha_2}\right)(M + O - kR) \tag{68}$$

Ann. agron., 1969, **20** (2), 183-200

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA COMPOSITION SPECTRALE DES RAYONNEMENTS D'ORIGINE SOLAIRE A L'AIR LIBRE ET SOUS UNE SERRE

R. BONHOMME

Station centrale de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Le rayonnement solaire est reçu au sol sous deux formes dont les compositions spectrales notamment sont différentes :

le rayonnement solaire direct,
le rayonnement solaire diffusé par le ciel.

Les compositions spectrales de ces deux rayonnements varient avec la hauteur du soleil, la pureté de l'atmosphère et la nature du couvert nuageux.

Par ailleurs, les parts du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus sont sensiblement différentes sous une serre de ce qu'elles sont à l'extérieur ; cette répartition varie en particulier avec la longueur d'onde.

L'auteur a pu faire les mesures indispensables pour préciser les points énoncés ci-dessus grâce à l'utilisation d'un appareil original décrit par ailleurs.

INTRODUCTION

La composition spectrale des rayonnements d'origine solaire reçus au sol est un facteur qui intéresse les agronomes et les biologistes. Compte tenu de nos préoccupations, ce travail a été entrepris en vue d'étudier, dans les conditions naturelles, la photosynthèse et les bilans d'énergie d'une feuille et d'une culture.

L'énergie utilisable par la photosynthèse se situe dans le domaine spectral compris entre 400 et 700 nm [1] ; à l'intérieur de ce domaine il est nécessaire de connaître la qualité de la lumière car l'efficience de l'énergie lumineuse est différente selon la

[1] 1 nm = 10^{-9} m = 10^{-3} μ = 10 Å (nm, nanomètre).

longueur d'onde, maximale dans le bleu (400-480 nm) et le rouge (630-680 nm), elle est minimale dans le vert (520-560 nm). D'autre part, l'ensemble des phénomènes biologiques photosensibles répond différemment à une excitation lumineuse suivant la composition spectrale de la lumière incidente. Il en résulte que les données relatives à la composition spectrale des rayonnements d'origine solaire sont également nécessaires à l'étude de problèmes de physiologie végétale et de biologie tels que : phototropisme, photomorphogenèse, synthèse de la chlorophylle, phénomènes biologiques relatifs aux animaux, insectes, parasites, etc.

Un certain nombre de généralités utiles à la compréhension du travail effectué, est rappelé dans une première partie. L'appareil de mesure que nous avons utilisé ayant déjà fait l'objet d'une publication (R. BONHOMME, Ph. CHARTIER, F. GANZ, 1967), nous nous contenterons ensuite d'en présenter les caractéristiques essentielles. Puis nous nous attacherons particulièrement aux résultats d'une étude expérimentale de la composition spectrale des rayonnements diffus et de sa variation dans les conditions naturelles avec :

la hauteur du soleil,
le trouble de l'atmosphère,
le couvert nuageux.

Cette étude des rayonnements diffus nous a paru justifier un certain nombre de déterminations expérimentales car peu de données quantitatives sont fournies dans ce domaine, alors que, annuellement, la moitié environ de l'énergie reçue au sol l'est sous forme de rayonnement diffus (dans les régions tempérées subhumides).

Par ailleurs, quelques mesures de composition spectrale des rayonnements d'origine solaire ont été effectuées d'une part sous une serre en verre et d'autre part sous une serre en plastique ; elles permettent de mieux préciser le rôle des propriétés optiques du matériau de couverture sur la photosynthèse des cultures sous serre.

I. — RAPPELS FONDAMENTAUX SUR LES RAYONNEMENTS D'ORIGINE SOLAIRE

La presque totalité de l'énergie émise par le soleil et atteignant le sol correspond à des rayonnements de longueur d'onde comprise entre 300 et 3 000 nm. Nous n'étudierons pas ici les rayonnements de grande longueur d'onde (5 000 à 50 000 nm) émis par des corps dont la température est dans le domaine des températures généralement rencontrées au niveau du sol.

I. 1. *Rayonnement global*

L'énergie d'origine solaire qui arrive au sol est composée de deux termes :

le rayonnement direct,
le rayonnement diffus du ciel et des nuages.

Pour tenir compte simultanément de ces deux formes de rayonnement, les météo-

rologistes ont été amenés à définir le rayonnement global G, comme l'éclairement énergétique reçu par unité de surface sur un plan horizontal, dans la gamme 300-3 000 nm. Il est donné par :

$$G = I \sin h + D$$

G étant le rayonnement global,
I le rayonnement solaire direct mesuré sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil,
h la hauteur du soleil,
D le rayonnement diffus du ciel, reçu sur un plan horizontal.

Le rayonnement global se mesure à l'aide de pyranomètres (piles thermoélectriques). Il s'exprime en watts par mètre carré ou en calories par centimètre carré et par minute (700 W m^{-2} = 1 cal cm^{-2} mn^{-1}). En été par ciel clair dans la région parisienne, le rayonnement global atteint 1 000 W m^{-2} environ ; par ciel couvert il ne dépasse pas 200 W m^{-2}.

Le caractère directionnel ou non de ces deux formes de rayonnement peut avoir des conséquences importantes sur le plan agronomique : par exemple, dans le cas de la photosynthèse d'un couvert végétal, la même énergie fournie sous l'une ou l'autre forme produit une photosynthèse différente (de Wit, 1965). En effet la répartition de l'énergie solaire entre les feuilles d'une culture est beaucoup plus favorable dans le cas du rayonnement diffus. On pourrait peut-être ainsi expliquer partiellement le fait que les rendements obtenus en climat tempéré humide soient élevés en dépit d'un rayonnement global faible dû à une forte nébulosité.

Ces deux rayonnements ont des compositions spectrales très différentes. Pour l'ensemble du spectre (300 à 3 000 nm), D représente 20 p. 100 de G ; dans le visible (400 à 700 nm), il en représente 26 p. 100 et pour la longueur d'onde 370 nm (active pour le phototropisme), 45 p. 100 de l'énergie est sous forme diffuse.

Il faut noter que pour connaître complètement le champ lumineux d'origine solaire en un point donné, il faudrait tenir compte de l'énergie réfléchie et diffusée par les corps situés au-dessous du point considéré. Compte tenu de la variété des situations qu'il est possible de rencontrer, l'étude de ces rayonnements réfléchis n'est pas abordée dans le présent travail.

1. 2. *Rayonnement solaire direct*

On a vu que le rayonnement solaire direct I était l'éclairement énergétique d'une surface normale à la direction des rayons solaires. On le mesure à l'aide d'un pyrrhéliomètre. Entre l'extérieur de l'atmosphère où ce rayonnement est pratiquement constant en quantité et en qualité et le sol, interviennent des modifications dues à :

— des phénomènes d'absorption (les composants de l'atmosphère qui influent le plus souvent sont : O_2, O_3, CO_2, H_2O),

— des phénomènes de diffusion.

Il en résulte que les variations de l'énergie et de la composition spectrale de ce rayonnement sont fonction notamment :

de la hauteur du soleil,
de l'altitude du lieu,
du trouble de l'atmosphère.

Étant donné son caractère directionnel, la composition spectrale du rayonnement solaire direct a été fréquemment étudiée, les mesures étant relativement aisées à l'aide d'un spectrophotomètre classique. La figure 1 montre, à titre d'exemple, cette composition spectrale hors de l'atmosphère et au sol pour différentes hauteurs du soleil h ; l'accroissement du trajet des rayons lumineux dans l'atmosphère entraîne une augmentation des phénomènes d'absorption sélective et de diffusion.

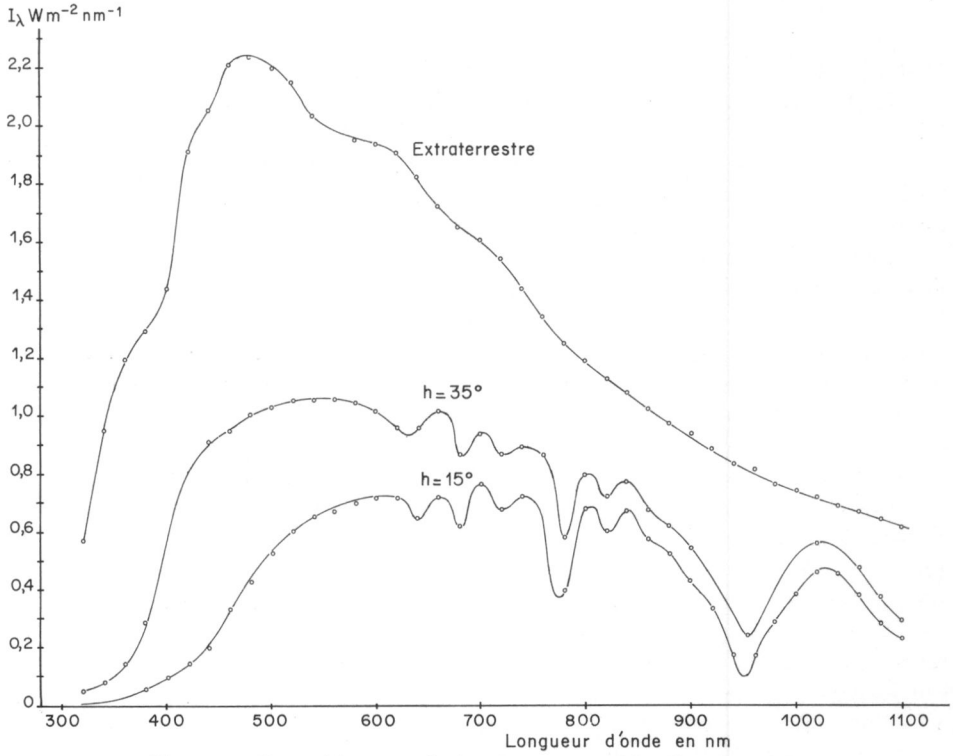


FIG. 1. — *Composition spectrale du rayonnement solaire direct au sol* I, *pour différentes hauteurs du soleil* h, *et au-delà de l'atmosphère*
(Cité par PERRIN DE BRICHAMBAUT, 1963)

1. 3. *Rayonnement diffusé par le ciel*

Une partie de l'énergie solaire atteint le sol sous forme de rayonnement diffus.

1. 31. *Généralités.*

La diffusion est un ensemble complexe de réfractions et de réflexions de la lumière par des particules. Pour une particule isolée la quantité de lumière diffusée dans une direction dépend :

de l'angle d'incidence du rayon lumineux,
de sa longueur d'onde λ,
de la taille de la particule,
de la nature de cette particule.

Dans le cas de l'atmosphère les phénomènes de diffusion se compliquent encore car ils sont dus à un grand nombre de particules dont la nature est différente. On distingue, en particulier :

— La diffusion moléculaire ou de Rayleigh qui existe toujours ; elle est due aux molécules des constituants de l'atmosphère, molécules dont la taille est inférieure à la longueur d'onde. La diffusion est alors inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde (λ^{-4}). Les rayonnements de courte longueur d'onde sont donc les plus diffusés : ceci explique la couleur bleue du ciel pur.

— La diffusion par les gouttes d'eau ou de Mie. Les gouttelettes ont un diamètre nettement supérieur à la longueur d'onde et la théorie électromagnétique permet de montrer que la diffusion est indépendante de la longueur d'onde (λ^{0}) : ceci explique notamment la couleur blanche des nuages.

— La diffusion par les aérosols qui est due à des particules dont le diamètre est variable mais toujours de faible dimension : fumées, poussières, cendres... La diffusion par ces aérosols se situe entre les deux domaines de diffusion précédents : l'exposant de λ peut prendre toutes les valeurs comprises entre — 4 et 0.

A côté de la diffusion, des phénomènes d'absorption sélective interviennent aussi pour modifier la composition spectrale du rayonnement diffusé par le ciel. Cette absorption correspond aux bandes d'absorption des gaz de l'air. Elle est fonction de la longueur du trajet parcouru par chaque rayon lumineux.

Le rayonnement diffusé par le ciel a donc une composition spectrale variable, en particulier avec la hauteur du soleil et avec la nébulosité (fig. 2). L'importance énergétique des rayonnements de courte longueur d'onde dans le cas du ciel clair ressort nettement, alors que dans le cas du ciel couvert la courbe obtenue s'étend vers les grandes longueurs d'onde.

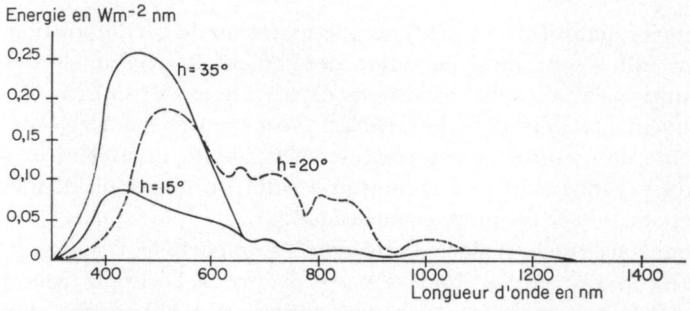


FIG. 2. — *Composition spectrale du rayonnement diffus, pour différentes hauteurs du soleil, par ciel clair et lorsque le ciel est couvert* (h = 20°)
(Cité par PERRIN DE BRICHAMBAUT, 1963)

Compte tenu des difficultés d'interprétation théorique des phénomènes de diffusion, des coefficients empiriques (facteur de trouble, coefficient de trouble...) ont été établis pour caractériser en particulier la pureté de l'atmosphère ; nous les utiliserons dans le présent travail.

1. 32. *Facteur et coefficient de trouble.*

Facteur de trouble de Linke (T).

Il indique le nombre fictif d'atmosphères pures et sèches qu'il faudrait pour réduire, par diffusion de Rayleigh seule, le rayonnement solaire direct extra-terrestre de la même quantité que celle produite par l'atmosphère réelle. La détermination en est simple car elle se fait à l'aide de tables, la seule mesure étant celle de I (mesure qui nécessite soit un pyrrhéliomètre, soit un pyranomètre et un écran pare-soleil). Ce coefficient permet des comparaisons entre différents lieux et différentes périodes ; toutefois il varie légèrement avec la hauteur du soleil, sans qu'il y ait pour autant variation du contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau et en poussières.

Coefficient de trouble d'Angström (β).

On admet que pour les longueurs d'onde inférieures à 630 nm, l'atténuation du rayonnement solaire direct est due essentiellement à la diffusion de Rayleigh et à la diffusion par les aérosols. ANGSTRÖM fait l'hypothèse que cette diffusion suit une loi de la forme $\beta \lambda^{-1,3}$. Le calcul du coefficient de trouble β se fait à partir de la mesure de l'énergie du rayonnement solaire direct pour $\lambda < 630$ nm ; il est donc nécessaire d'utiliser un pyrrhéliomètre et un filtre convenable (filtre RG 2).

D'autres coefficients sont employés mais les déterminations en sont plus difficiles (Ex. : coefficient de Schepp) ; dans tous les cas il convient de faire des corrections de pression atmosphérique afin de tenir compte des variations de l'épaisseur optique d'air traversé.

1. 33. *Justification d'une étude de la composition spectrale du rayonnement diffus.*

Les données quantitatives relatives à la variation de la composition spectrale du rayonnement diffus sont rares en raison des difficultés expérimentales (fig. 2). De plus les définitions exactes des conditions de mesure et des surfaces de référence ne sont pas souvent précisées dans les articles. C'est pourquoi nous avons entrepris un certain nombre de mesures de composition spectrale du rayonnement diffus et, par extension, du rayonnement global, puisqu'il suffit de placer ou d'enlever un écran cache-soleil pour passer du premier au second.

En ce qui concerne la surface de référence, il importe de remarquer que pour un corps placé au niveau du sol, tout se passe comme si l'énergie reçue provenait de sources situées dans toutes les directions au-dessus de l'horizon, et émettant des énergies lumineuses variables en intensité et en composition spectrale. Compte tenu de l'hétérogénéité de ces sources, l'éclairement d'un corps dépend notamment de sa forme. Il est donc nécessaire de bien définir la surface de référence qui va être utilisée pour les mesures. La surface de référence que nous avons choisie dans le présent travail est une surface plane, horizontale et dirigée vers le haut. Cette solution a été retenue car d'une part les bilans d'énergie se font habituellement sur des surfaces planes dans les conditions naturelles et d'autre part les données météorologiques classiques sont recueillies également sur des surfaces planes et horizontales.

Le choix de cette surface de référence implique que l'appareil de mesure reçoive tous les rayons lumineux situés dans un angle solide bien défini, égal à 2 π stéradians et centré sur la verticale du point considéré.

II. — APPAREIL DE MESURE

L'appareil de mesure utilisé (R. BONHOMME, Ph. CHARTIER, F. GANS, 1967) est constitué d'une part d'un spectrophotomètre qui permet une analyse de la lumière entre 200 et 2 000 nm et d'autre part d'un dispositif de conversion d'angle solide qui permet aux rayons lumineux compris dans 2π stéradians de pénétrer dans le monochromateur. Le principe du convertisseur découle d'une propriété de l'ellipse : la normale en un point est bissectrice des rayons vecteurs. Il en résulte (fig. 1,on a réalisé les rayons lumineux qui passent par un foyer F_1 passeront après réflexion par un foyer F_2. Si l'on transforme en miroir la partie de l'ellipsoïde représentée en trait plein sur la figure 1, on a réalisé un convertisseur d'angle solide. Un dispositif optique (fig. 4) qui comprend 3 miroirs plans (M_2,M_3 et M_4) et deux miroirs concaves (S_1 et S_2) renvoie les rayons lumineux convergents en F_2 sur la fente d'entrée *f* du spectrophotomètre ; tout l'appareil est réglé de façon que l'angle solide α du cône enveloppant les rayons qui convergent au second foyer de l'ellipsoïde soit égal ou inférieur à celui qu'admet le spectrophotomètre.

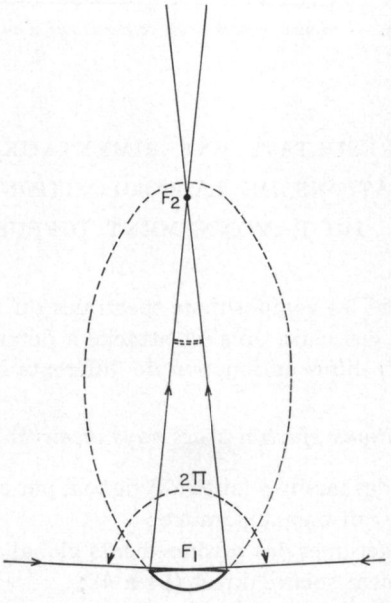


FIG. 3. — *Principe du convertisseur d'angle solide*

Une correction de la réponse de l'appareil en fonction de la hauteur de la source émettrice et une technique d'étalonnage du dispositif de mesure permettent d'obtenir les éclairements énergétiques monochromatiques de surfaces planes horizontales.

Si l'on dispose un petit disque qui intercepte le rayonnement solaire direct, l'appareil mesure la composition spectrale du rayonnement diffus D ; en l'absence de ce disque, il mesure la composition spectrale du rayonnement global G.

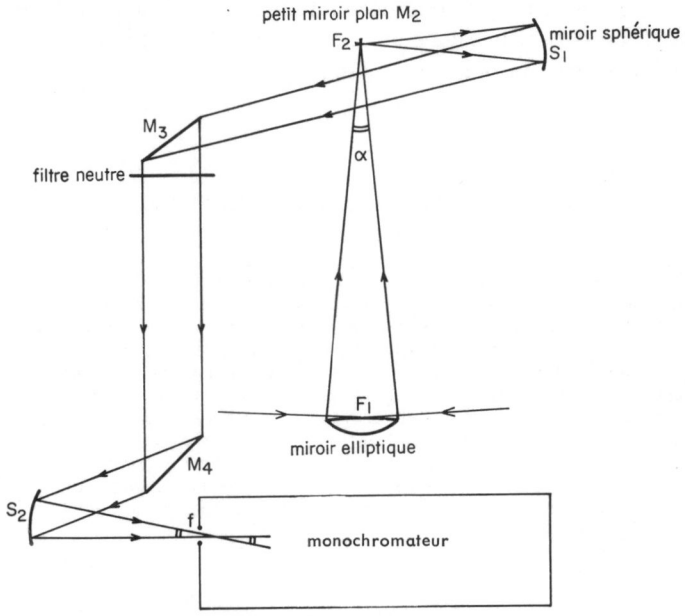


FIG. 4. — *Montage optique du convertisseur d'angle solide*

III. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX RELATIFS AUX VARIATIONS DE LA COMPOSITION SPECTRALE DU RAYONNEMENT DIFFUS

Après avoir comparé les compositions spectrales du rayonnement global et du rayonnement diffus par ciel clair, on s'est attaché à déterminer les variations de la composition spectrale du diffus en fonction de différents facteurs.

3. 1. *Compositions spectrales des rayonnements global et diffus*

La figure 5 traduit des mesures faites à Avignon, par ciel clair, pour une hauteur de soleil égale à 48° ; elle fait bien apparaître :

— les apports énergétiques des rayonnements global et diffus et, par différence, la part due au rayonnement solaire direct (I sin *h*) ;

— le déplacement vers le bleu du maximum d'énergie dans le cas du diffus et la richesse relative en ultraviolet de ce dernier ;

— la pauvreté relative en radiations de longueur d'onde supérieure à 500 nm.

Ainsi, dans une zone très abritée du rayonnement solaire direct (fond de vallée encaissée, façade nord d'un obstacle naturel ou artificiel etc.) où l'énergie solaire directe arrive difficilement, même après réflexion, la lumière du jour est sensiblement différente de celle régnant en zone ensoleillée ; elle est plus riche en radiations bleues et ultraviolettes, plus pauvre en rouge et infrarouge.

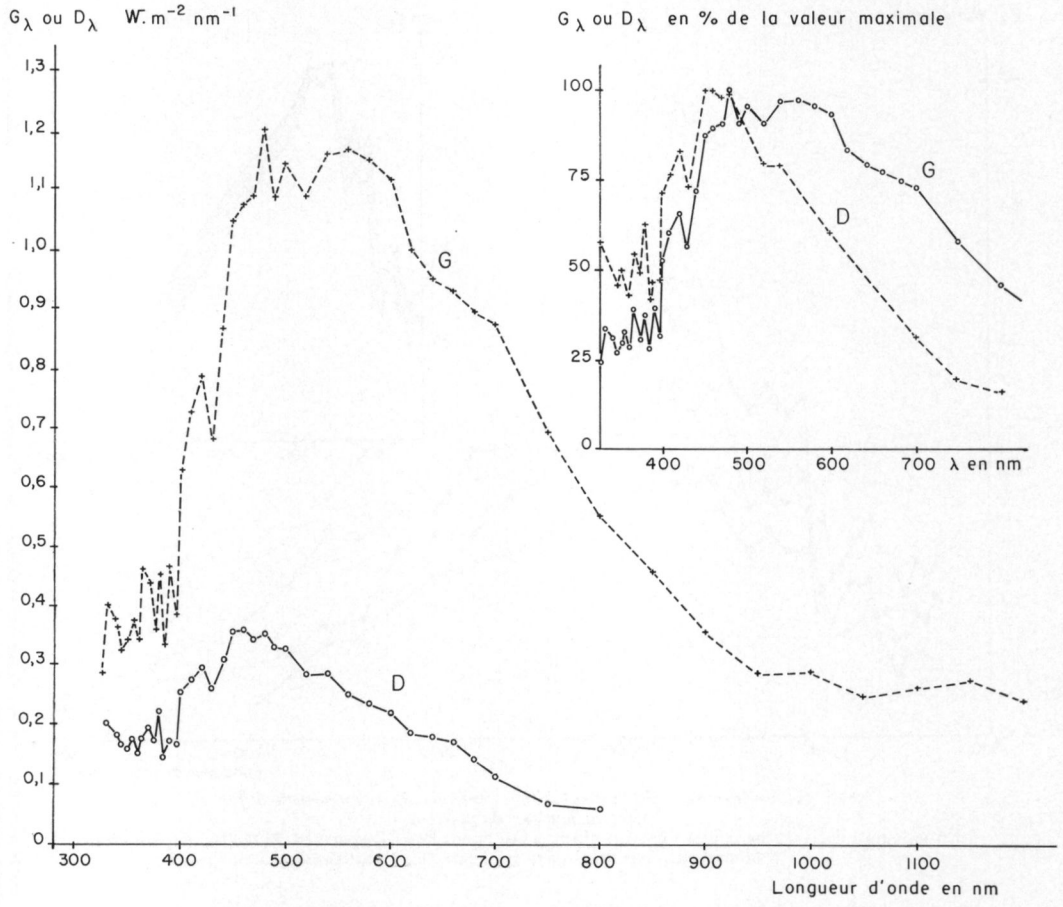


FIG. 5. — *Composition spectrale du rayonnement global G et du rayonnement diffus D*

G = 745 W m^{-2}
D = 154 W m^{-2}
h = 48° (h, hauteur du soleil)

Avignon-Montfavet, 28-7-1967, 10 heures *T. S. V.* (temps solaire vrai), ciel clair
(R. BONHOMME)

3. 2. *Composition spectrale du rayonnement diffus et hauteur du soleil*

On sait que l'énergie totale diffusée croît avec la hauteur du soleil jusque vers 30-40°, puis varie peu au-delà. Quant à la composition spectrale, les données sont plus rares, c'est ce qui nous a amené à procéder à quelques mesures ; celles-ci ont été réalisées en amtosphère assez pure et stable (β = 0,030, T = 2,1), par ciel clair, au mont Ventoux (fig. 6). La composition spectrale, dans ce cas au moins, ne varie pas sensiblement pour des hauteurs de soleil allant de 5 à 21° ; en pourcentage de la valeur maximale, les points expérimentaux s'inscrivent en effet entre les deux courbes indiquées sur la figure 6 (graphique supérieur).

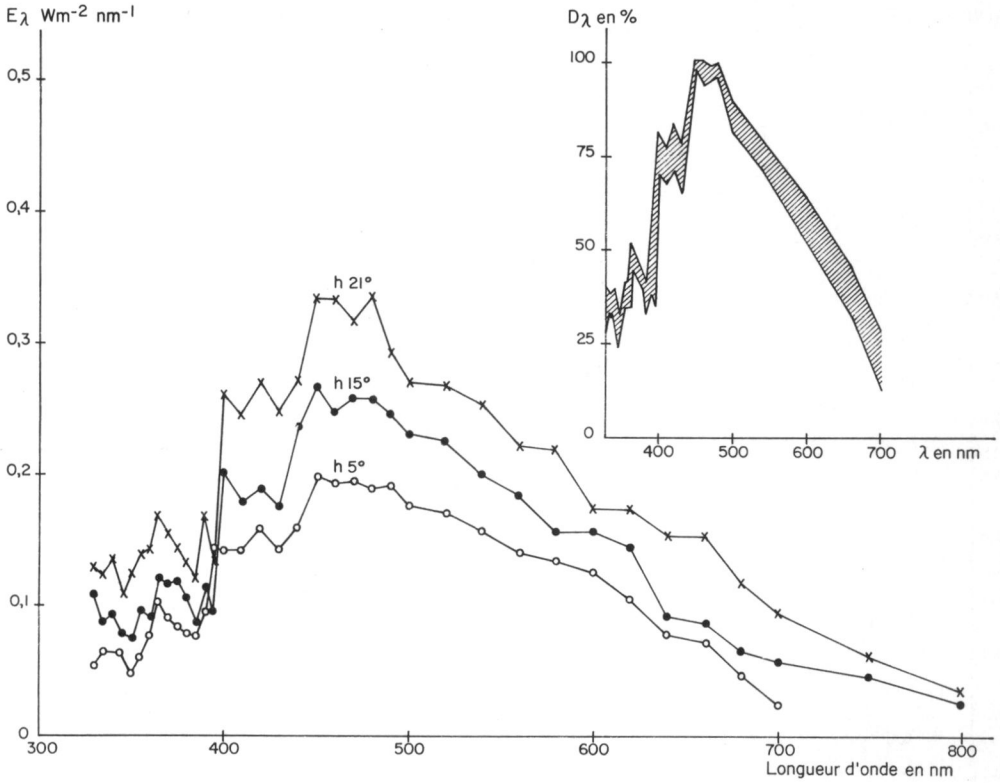


FIG. 6. — *Variations de la composition spectrale du rayonnement diffus D avec la hauteur du soleil* h
En valeurs relatives, les points expérimentaux s'inscrivent dans l'espace hachuré (fig. supérieure). Mont-Ventoux, 27-7-1967, ciel clair (R. BONHOMME)

3. 3. *Composition spectrale du rayonnement diffus et trouble atmosphérique*

La quantité totale d'énergie diffusée croît avec le trouble atmosphérique. Pour caractériser les modifications de composition spectrale en fonction du trouble atmosphérique, une série de mesures a été effectuée pour des hauteurs de soleil légèrement différentes, mais dans des conditions de pureté de l'atmosphère très différentes :

Mont Ventoux	$\beta = 0{,}030$	
Avignon (Montfavet)	$\beta = 0{,}175$	$T = 3{,}6$
Région parisienne (Versailles)		$T = 4{,}5$

Comme le montre la figure 7, pour des troubles atmosphériques croissants, la diffusion des grandes longueurs d'onde augmente sous l'effet des aérosols (fumées, poussières, cendres etc.) ; la déformation est d'autant plus marquée que le trouble est plus important. C'est ainsi qu'à proximité des grandes agglomérations, la courbe de composition spectrale du rayonnement diffus, même par ciel clair, s'étale vers les grandes longueurs d'onde (ciel blanc laiteux par beau temps au voisinage d'une zone polluée).

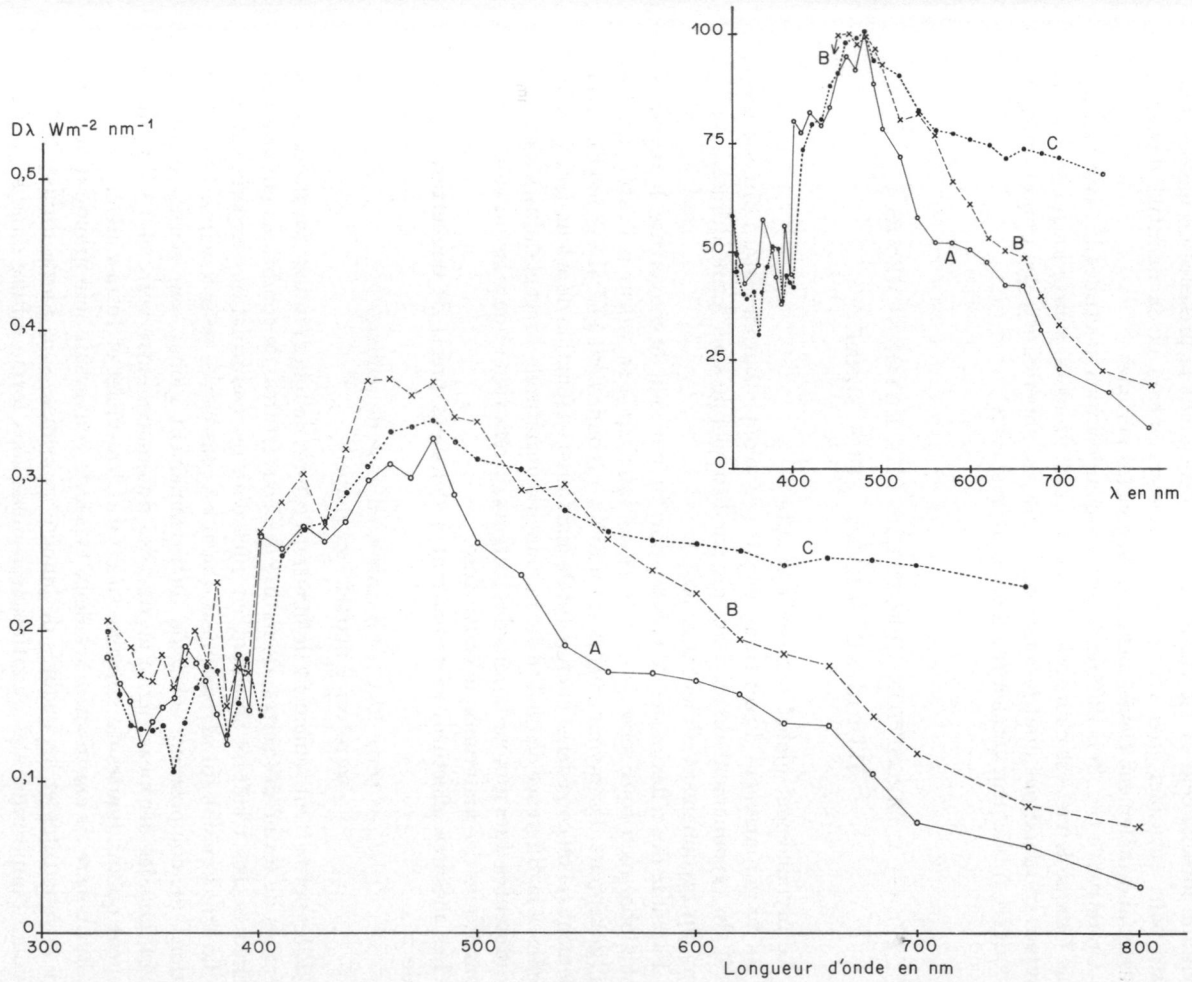


FIG. 7. — *Variations de la composition spectrale du rayonnement diffus D avec le trouble atmosphérique lorsque le ciel est clair*
Courbe A : β = 0,030 (β coefficient de trouble d'Angström) Mont-Ventoux, 27-7-1967, 7h 30 TSV
Courbe B : β = 0,175 T = 3,6 (T, facteur de trouble de Linke) Avignon-Montfavet, 28-7-1967, 10 h *T. S.* .
Courbe C : T = 4,5 Versailles, 25-5-1967, 9 h 30 *T. S. V.* (R. BONHOMME)

3. 4. *Composition spectrale du rayonnement diffus et type de couvert nuageux*

Lorsque la nébulosité augmente, le rayonnement diffus croît puis passe par un maximum lorsque celle-ci est voisine de 0,5 ; cependant la présence de masses nuageuses peut entraîner, par réflexion, des accroissements de la quantité d'énergie diffusée, anormalement élevés, pendant de courtes périodes.

On retrouve (fig. 8) la différence entre les compositions spectrales du rayonnement diffus lorsque le ciel est clair (abondance des radiations de courte longueur d'onde, pauvreté en radiations dont la longueur d'onde est supérieure à 500 nm) et lorsqu'il est couvert totalement (étalement dans tout le spectre).

IV. — COMPOSITION SPECTRALE DES RAYONNEMENTS D'ORIGINE SOLAIRE SOUS SERRE

Le rayonnement global sous serre résulte :

a) du rayonnement direct transmis par l'enveloppe tout en restant directionnel,

b) du rayonnement direct transmis par l'enveloppe sous forme diffuse,

c) du rayonnement diffus transmis.

Par suite des réflexions et de l'absorption du matériau de couverture, le rayonnement global reçu sous serre ($a + b + c$) est inférieur à sa valeur à l'extérieur. De plus, le rapport des rayonnements diffusés au rayonnement global est modifié non seulement si l'on considère l'énergie totale mais aussi en fonction de la longueur d'onde. En effet, à la différence de qualité des rayonnements naturels direct et diffus, s'ajoutent des différences dues aux variations des facteurs de réflexion et de transmission monochromatiques des matériaux de couverture.

Les mesures effectuées se rapportent à deux cas précis de couverture translucide :

serre PVC « Fil clair », en anse de panier,
serre verre martelé, en chapelle.

Elles permettent seulement de montrer l'intérêt de telles études ; étant donné les diversités de forme des serres, de nature des couvertures, de conditions climatiques extérieures, ces résultats appellent en effet d'autres confirmations expérimentales.

La transmission du rayonnement global est plus élevée pour le verre. Les modifications de composition spectrale du rayonnement global sont sensiblement les mêmes dans les deux cas (fig. 9 et 10) ; des différences entre verre et PVC n'interviennent qu'aux limites du domaine spectral (Ultra-violet et Infra-rouge).

Par contre, il existe entre les deux types de couverture une grande différence entre les quantités et les qualités de lumière transmises sous forme diffuse. Si l'on considère l'importance des quantités transmises sous forme diffuse dans les phénomènes de photosynthèse (§ 1. 1.), le fait que dans une serre en PVC par exemple, les radiations visibles existent essentiellement sous cette forme, est favorable à la production. Dans des régions à fort ensoleillement, le handicap causé par la transmission plus faible d'un matériau très diffusant peut être compensé, en ce qui concerne la photosynthèse, par une plus grande diffusion de lumière, tandis que cette

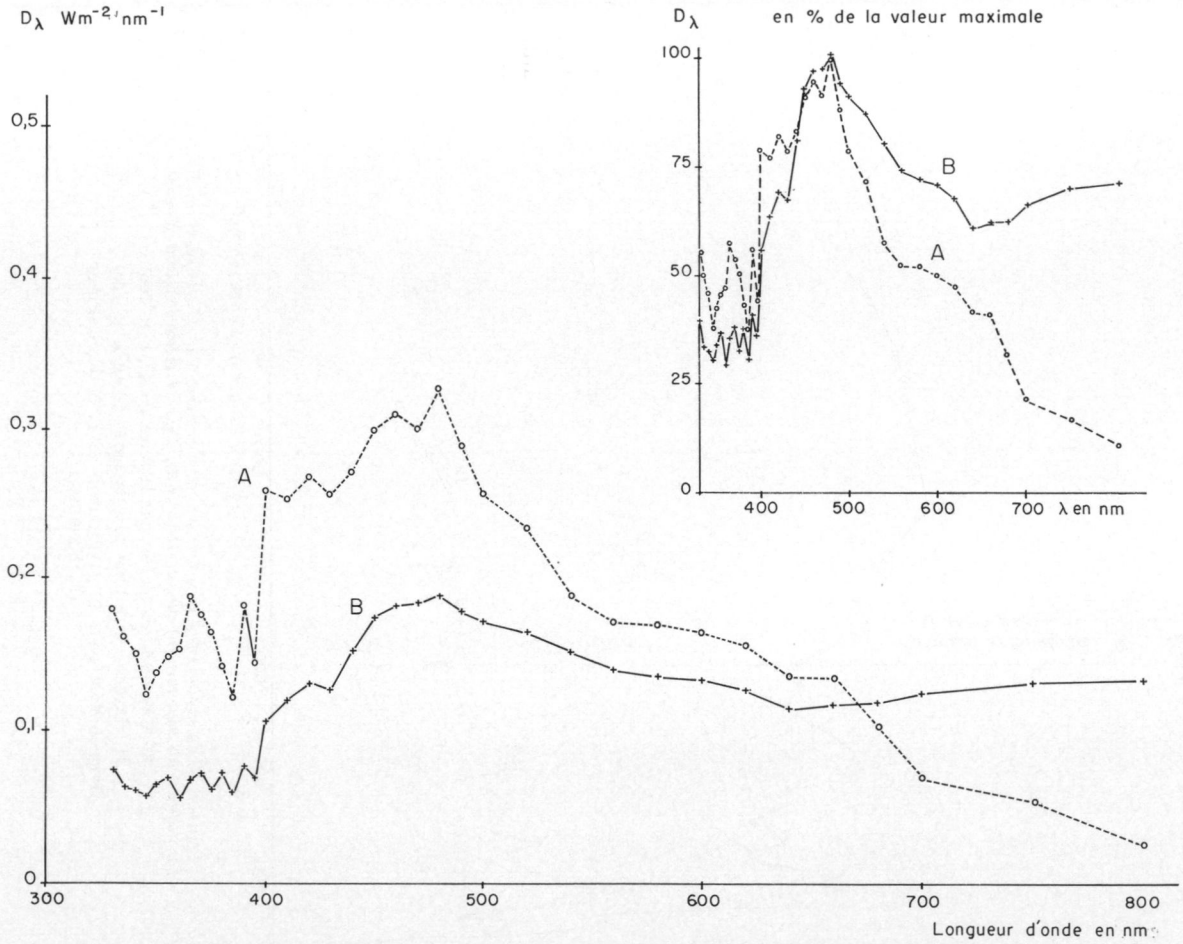


FIG. 8. — *Variations de la composition spectrale du rayonnement diffus D selon que le ciel est clair ou complètement couvert*
Courbe A : *Ciel clair*, Mont-Ventoux, G = 875 W m^{-2} D = 126 W m^{-2} 27-7-1967, 7 h 30 *T. S. V.*
Courbe B : *Ciel couvert*, Versailles, G = D = 140 W m^{-2} 9-6-1967, 8 h 15 *T. S. V.* (R. BONHOMME)

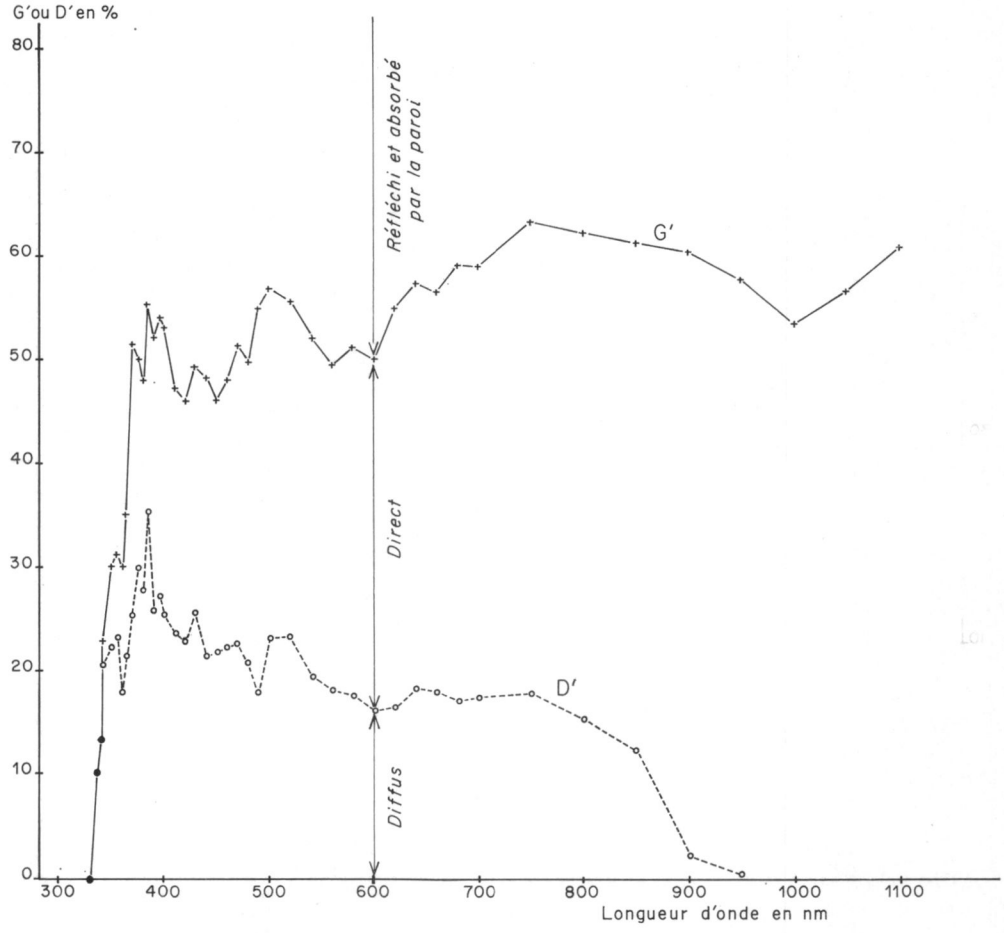


FIG. 9. — *Pourcentage du rayonnement reçu sous une serre en verre martelé* (global G' et diffus D') *par rapport au rayonnement global extérieur G, pour la même longueur d'onde*

G' Rayonnement global sous la serre ($G'\lambda/G\lambda \times 100$)

D' Rayonnement diffus sous la serre ($D'\lambda/G\lambda \times 100$)

Avignon-Montfavet, 28-7-1967, 10 h 30 *T. S. V.*, ciel clair
(R. BONHOMME)

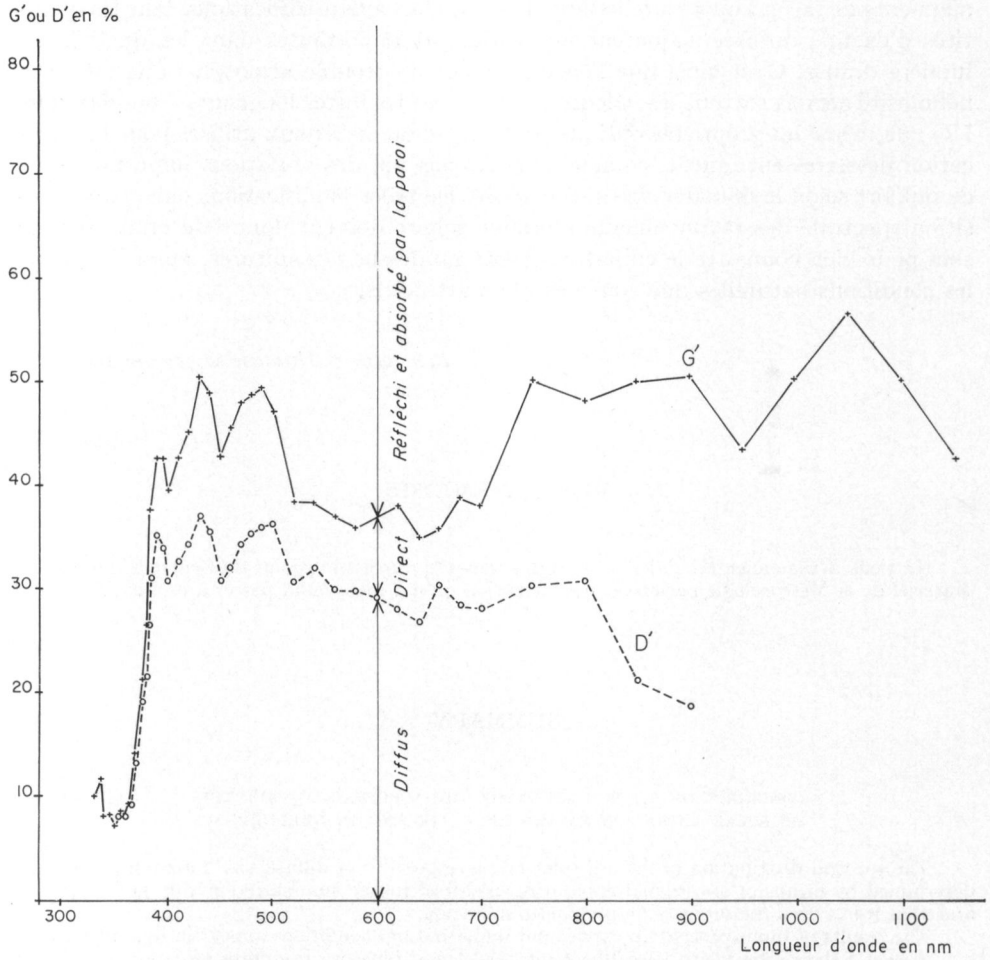


FIG. 10. — *Pourcentage du rayonnement reçu sous une serre en PVC* (global G′ et diffus D′) *par rapport au rayonnement global extérieur G, pour la même longueur d'onde*
G′ Rayonnement global sous la serre ($G'\lambda/(G\lambda \times 100)$)
D′ Rayonnement diffus sous la serre ($D'\lambda/(G\lambda \times 100)$)
Avignon-Montfavet, 28-7-1967, 10 h 50 *T. S. V.*, ciel clair
(R. BONHOMME)

faible transmission est avantageuse d'un point de vue énergétique, en limitant l'échauffement et la régulation stomatique.

CONCLUSION

Si l'on considère le rapport du rayonnement diffus au rayonnement global (D/G), on constate que sa valeur, qui décroît avec la hauteur du soleil, croît avec le trouble atmosphérique et la nébulosité. La présence de matériaux de couverture diffusants

augmente de façon importante le rapport D/G. Mais aux modifications dans les quantités d'énergie diffusée s'ajoutent des variations importantes dans les qualités de lumière diffuse. C'est ainsi que l'accroissement du trouble atmosphérique ou de la nébulosité accroît surtout les valeurs de D/G pour les fortes longueurs d'onde (rouge, IR) ; de même les propriétés optiques différentes de matériaux utilisés pour la fabrication de serres entraînent, comme nous l'avons vu, des variations importantes de ce rapport selon le domaine spectral exploré. De telles modifications dans la composition spectrale des rayonnements d'origine solaire doivent donc être étudiées avec soin pour bien connaître le climat lumineux au-dessus des cultures, aussi bien dans les conditions naturelles que sous des abris artificiels.

Reçu pour publication en janvier 1969.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. PERRIN DE BRICHAMBAUT, directeur adjoint du Centre technique du Matériel de la Météorologie nationale, de l'attention qu'il a bien voulu porter à ce travail.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE SPECTRAL DISTRIBUTION OF SOLAR RADIATION IN THE OPEN AIR AND IN GREENHOUSES

The spectral distribution of rays of solar origin, especially of diffuse sky radiation, has been determined by means of an original apparatus, described rather summarily in this article (fig. 3 and 4) as it has been the subject of a previous publication.

The results of the investigation carried out under natural conditions appear in fig. 5, 6, 7, 8.

Figure 5 shows the relative wealth of ultraviolet and blue in the diffuse radiation D, and its poverty in wavelengths above 500 nm in relation to global radiation G ;

Figure 6 shows how little the diffuse radiation observed is modified by the varying altitude of the sun ;

Figure 7 shows the influence of atmospheric purity under a clear sky on the spectral distribution of diffuse radiation ;

Curve A refers to a pure atmosphere,

Curves B and C refer to turbid atmosphere ;

Figure 8 shows the exact difference of spectral distribution between the diffuse radiation from a clear sky (curve A) and from a cloudy sky (curve B).

Figures 1 and *2*, borrowed from other authors, complete the above information with regard to :

— the variation of the spectral distribution of direct solar radiation in relation to the altitude of the sun (fig. 1),

— the variation of the spectral distribution of diffuse radiation in relation to the altitude of the sun and in cloudy conditions.

Figures 9 and *10* demonstrate the important modifications undergone by solar radiation, both direct and diffuse, when it penetrates a greenhouse covered with hammered glass (fig. 9) or PVC (fig. 10). The most striking point is the increase in the proportion of diffuse radiation in the global radiation inside a greenhouse, especially in the blue range. This increase is particularly important, and occurs throughout the spectrum when the greenhouse is constructed in PVC.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DES SPEKTRUMS
DER SONNENSTRAHLUNGEN IM FREIEN UND IM TREIBHAUS

Das Spektrum der von der Sonne stammenden Strahlungen, insbesondere der vom Himmel verteilten Strahlungen, wurde dank der Verwendung eines in diesem Aufsatz (Abb. 3 und 4) kurzbeschriebenen, aber schon früher ausführlich besprochenen geräts, bestimmt.

Die Ergebnisse der im Freien durchgeführten Messungen sind in den Abb. 5, 6, 7, und 8 dargestellt.

Die Abbildung 5 zeigt den relativ grossen Anteil an Ultraviolett und Blau der diffusen Strahlung Dund den geringen Anteil an strahlungen höherer Wellenlängen über 500 nm im Verhältnis zur Gesamtausstrahlung G ;

Die Abbildung 6 zeigt die schwachen beobachteten Aenderungen der diffusen Strahlung für verschiedene Höhe der Sonne.

Die Abbildung 7 zeigt den Einfluss der Reinheit der Atmosphäre bei heiterem Himmel, auf die Zusammensetzung des Spektrums der diffusen Strahlungen :

Die Kurve A bezieht sich auf eine heitere Atmosphäre.

Die Kurven B und C beziehen sich auf trübe Atmosphären.

Die Abbildung 8 lässt den deutlichen Unterschied im Spektrum der diffusen Strahlung bei heiterem Himmel (Kurve A) und bei bewölktem Himmel erkennen.

Die anderen Verfassern entlehnten Abbilddungen I und 2, ergänzen die obigen Feststellungen betreffent :

— die Aenderung der Zusammensetzung des Spektrums der direkten Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von der Höhe der Sonne (Abb. I) :

— die aendrung der Zusammensetzung des Spektrums der diffusen Strahlung in Abhängigkeit von der Höhe der Sonne und dem Bewölkungsgrad. (Abb. 2).

Die Abbildungen 9 und 10 unterstreichen die bedeutenden Aenderungen, die die direkten und diffusen Sonnenstrahlungen erleiden, wennman die Versuche im einem Treibhaus unter gehämmertem Glas (Abb. 9) oder unter P. V. C.-Kunststoff (Abb. 10) Vornimmt. Daraus folgt in erster Linie, dass eine Zunahme des Anteils der diffusen Strahlung bezüglich der Gesamtstrahlung unter Treibhaus besteht, insbesonders im Gebiet der Blaustrahlung. Diese Zunahme ist bedeutender und erstreckt sich auf das gesamte Spektrum im Falle eines Treibhauses aus Kunststoff P. V. C. (Polyvinylchlorid).

РЕЗЮМЕ

К изучению спектрального состава излучений солнечного происхождения на открытом воздухе и в теплице.

Р. БОНОМ.

Автор проделал спектральный анализ излучений солнечного происхождения, в частности рассеянных небом солнечных излучений, с помощью оригинального аппарата (Рис. 3 и 4), описанного только вкратце в данной работе, так-как он уже был в свое время темой одной из пред' идущих публикаций.

Результаты измерений проведенных в естественных условиях, представлены на рисунках 5, 6. 7 и 8.

Рисунок 5 — указывает на сравнительное богатство рассеянного излучения D в ультра-фиолетовых и синих частях спектра и чрезвычайную его бедность в длиннах волн превышающих 500 nm, по сравнению с общим излучением G.

Из *рисунка 6* явствует что изменеия высоты солнца вызывают небольшие перемены спектра рассеянного излучения.

Из рисунка 7 — видно что чистота атмосферы при ясной погоде влияет на спектральный состав рассеянного излучения;

— Кривая A — относится к атмосфере прозрачной;

— Кривые B и C — к атмосферам замутненным;

Рисунок 8 — показывает разницу состава спектра рассеянного излучения с ясного неба (кривая A), и с неба затянутого (кривая B).

Рисунки 1 и 2 заимствованные из библиографии пополняют вышеуказанные сведения в том что относится :

— к изменениям состава спектра прямых солнечных излучений по мере изменения высоты солнца;

— к изменениям состава спектра рассеянного излучения по мере изменения высоты солнца и облачности;

На *рисунках 9 и 10* фигурируют крупные изменения которым подвержены прямые и рассеянные солнечные излучения проникающие через кованное стекло теплицы (рис. 9), или пластмассу (поливинил) (рис. 10). Нужно отметить увеличение количества рассеянного излучения в общем излучении проникшем в теплицу, особенно в синей части спектра. Это увеличение особенно чувствительно и относится ко всей совокупности спектра в случае теплицы из пластмассы (поливинил).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BONHOMME R., CHARTIER Ph., GANS F. Mesure de la composition spectrale d'un rayonnement diffus. *La Météorologie, (*sous presse).

CHARTIER Ph., 1966. Étude du microclimat lumineux dans la végétation. *Ann. agron.*, **17** (5), p. 571-602.

Comité National Belge de l'Éclairage, 1964. *L'éclairage naturel et ses applications*. S. I. C. Bruxelles.

CONDIT H. R., GRUN F., 1964. Spectral energy distribution of daylight. *J. Opt. Soc. Amer.*, **54**, 7, 937 944.

COSTES C., 1960. Absorption et utilisation de l'énergie lumineuse par les végétaux cultivés dans les conditions naturelles. *Ann. Physiol. vég.*, **3**, 175-229.

C. S. A. G. I., 1957. *Manuel d'Instructions : Météorologie, Instruments et mesures de rayonnement.* (Commission de Rayonnement, U. G. G. I.

DURAND R., 1960. Mesure et signification de l'éclairement en physiologie végétale. *Ann. Physiol. vég.*, **2**, 111-118.

FLACH E., 1960. Klimatologische Untersuchung über die geographische Verteilung der Globalstrahlung und der diffusen Himmelstrahlung. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, **2**, 4, 161-183.

GATES M., 1960. Spectral distribution of solar radiation at the earth's surface. *Science*, **151**, 3710, 523-529.

HULL J. N., 1954. Spectral distribution of radiation from sun and sky. *Trans. Illum. Eng. Soc. London*, **9**, 1, 21-28.

PERRIN DE BRICHAMBAUT Ch., 1963. *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*, 299 p. Gauthier-Villars.

ROBERTSON L., 1966. The light composition of solar and sky spectra available to plants. *Ecology*, **47** (4), 640-643.

ROBINSON N., 1966. *Solar radiation*, p. 347. Elsevier Publishing Company.

TAYLOR A. H., KERR G. P., 1941. The distribution of energy in the visible spectrum of daylight. *J. Opt. Soc. Amer.*, **31**, 3-8.

VALKO P., 1966. Die Himmelstrahlung in ihrer Bezichung zu verschiedenen Parameterm. *Arch. Meterol. Geophys. Bioklimat.*, B, **14**, 3-4, 336-359.

De WIT C. T., 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Rep.*, nº 663, Wageningen.

Ann. agron., 1969, **20** (2), 201-216

CONTRÔLE DE LA NUTRITION MINÉRALE DES PLANTES PAR L'ANALYSE DES EXTRAITS DE TISSUS CONDUCTEURS. APPLICATION A LA LUZERNE

M. CLAIRON, W. ROUTCHENKO

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, 33 - Pont-de-la-Maye
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La Luzerne est cultivée sur sable et solutions nutritives dont l'équilibre entre éléments est maintenu constant, mais à des concentrations ioniques croissantes. L'expérience a pour but de mettre en évidence la nature du facteur alimentaire limitant la croissance, et l'accumulation des ions absorbés en excès sans profit pour le végétal.

La croissance et le développement sont appréciés par des moyens biométriques et des pesées de plantes, alors que l'état chimique est déterminé par l'analyse des feuilles et l'analyse des sucs extraits de tissus conducteurs.

Les résultats montrent que l'analyse des sucs permet de définir le rôle biologique de chacun des éléments et de constater l'accumulation, sous la forme ionique ou seulement partiellement métabolisée, des éléments absorbés en excès par rapport à l'élément limitant.

I. — INTRODUCTION

L'étude porte sur la croissance et le développement de la Luzerne cultivée sur sable et solution nutritive à trois niveaux de concentration.

L'équilibre entre les divers éléments contenus dans les différentes solutions est le même ; il correspond à une légère déficience en azote, en présence de quantités excessives de phosphore et d'un rapport K/Ca trop élevé (SCHEIDECKER, 1968).

Le choix de cet équilibre a pour but de mettre en évidence la limitation de la croissance et du développement de la plante par l'élément se trouvant au niveau le plus bas et l'accumulation sous la forme minérale, donc sans profit pour le végétal, des ions absorbés en excès.

L'effet des différents traitements est apprécié, en ce qui concerne le développement, au moyen de la notation des dates d'apparition des différents étages foliaires et de formation de boutons floraux et, en ce qui concerne la croissance, en se référant au poids de matière fraîche produite. L'état chimique des plantes est apprécié, d'une part, à l'aide de l'analyse globale portant sur la matière sèche des feuilles et des racines et, d'autre part, en recourant à l'analyse d'extraits frais des tissus conducteurs (pétioles, tiges et racines).

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'expérimentation porte sur une Luzerne hybride, *Medicago varia*, du type *Poitou*. Les vases de végétation, réalisés en polyéthylène, sont représentés sur la figure 1. Le substrat est constitué, en partant de la base, par :

— une couche de 5 cm d'épaisseur de quartz broyé de 5 mm de ∅ moyen ;

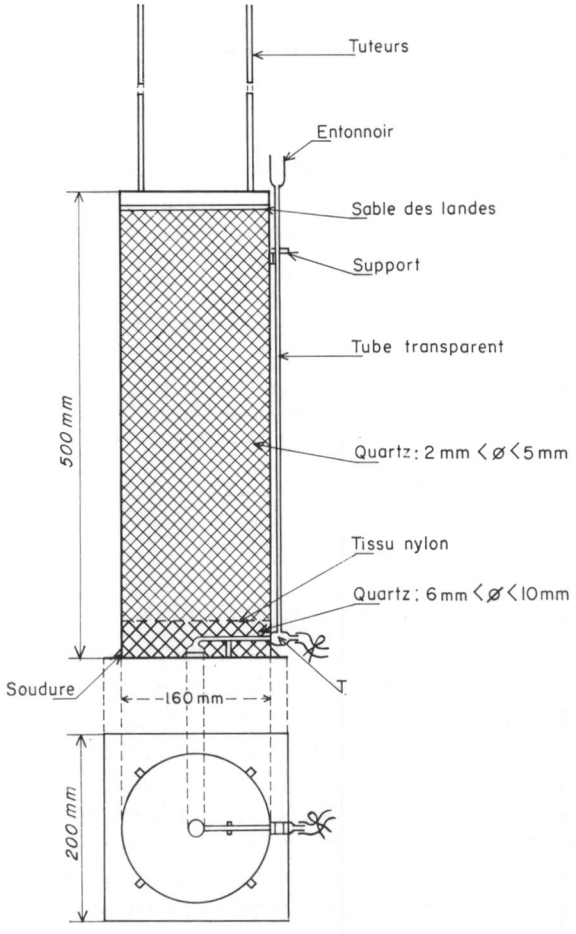


FIG. 1. — *Vase de végétation* (de profil et en élévation)

— une couche de 40 cm de quartz de 3 à 5 mm de ∅, séparée de la précédente par un tamis en nylon ;

— une couche de 2 cm de sable fin.

L'analyse globale, portant sur la matière sèche des feuilles et des racines, est effectuée en ce qui concerne N et P après minéralisation par voie humide ($SO_4H_2 + H_2O_2$) et pour les cations K^+, Ca^{++}, Mg^{++} et Na^+ par photométrie de flamme en milieu oxine (DELAS, 1964). L'appareil utilisé est un spectrophotomètre Beckman du type G 4 700, équipé d'un dispositif de flamme Beckman G 9 200.

L'analyse des extraits frais a été exécutée suivant la méthode préconisée par W. ROUTCHENKO (1967).

III. — CONDITIONS ET CONDUITE DE L'ESSAI

L'expérience comporte trois traitements répétés quatre fois. Les traitements sont représentés par trois niveaux de concentration des solutions nutritives.

Les concentrations ioniques figurant au tableau I se rapportent à la solution I (18,5 méq/l). La concentration de la solution II est double de la première (37 méq/l) et celle de la solution III est double de la seconde (74 méq/l). Le même volume de solution d'oligo-éléments, constituée selon la formule de SHIVE et ROBBINS (1942), est ajouté à tous les traitements.

TABLEAU I

Équilibre des anions et des cations

(Solution nutritive, niveau 1 à 18,5 méq/l)

	NH_4^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Σ cations
NO_3^-.....	1,25		1,5		2,75
$PO_4H_2^-$.....		3			3
SO_4^{--}.....			2	1,5	3,5
Σ anions	1,25	3	3,5	1,5	9,25

Le pH de ces solutions est voisin de 5. Les solutions sont apportées *per ascensum* et renouvelées quotidiennement.

Les graines, préalablement inoculées avec une souche efficiente de *Rhizobium meliloti* provenant du Laboratoire de Microbiologie de l'I. N. R. A. à Dijon, sont semées le 20 mars 1967 ; la levée, très régulière, a eu lieu 3 jours après.

La première coupe a été effectuée le 12 mai, soit 53 jours après le semis, et la seconde 33 jours après la première.

Entre-temps, on a effectué diverses mesures et notations qui serviront à apprécier le rythme de développement des plantes.

IV. — OBSERVATIONS ET NOTATIONS RÉALISÉES EN COURS DE VÉGÉTATION

Le rythme de formation des différents étages foliaires, en fonction des traitements, est représenté sur la figure 2.

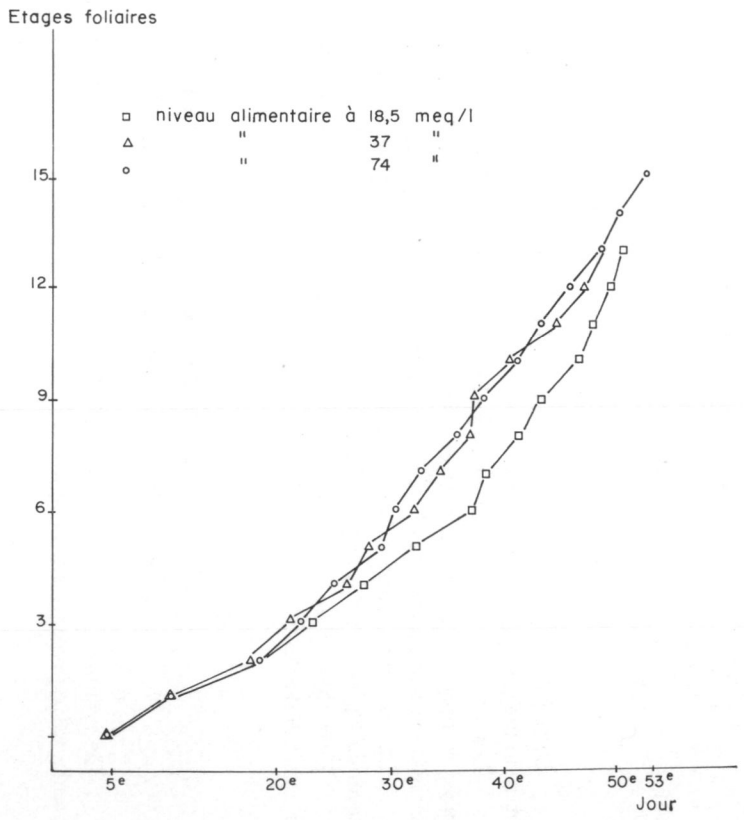


FIG. 2. — *Appréciation du développement des plantes*

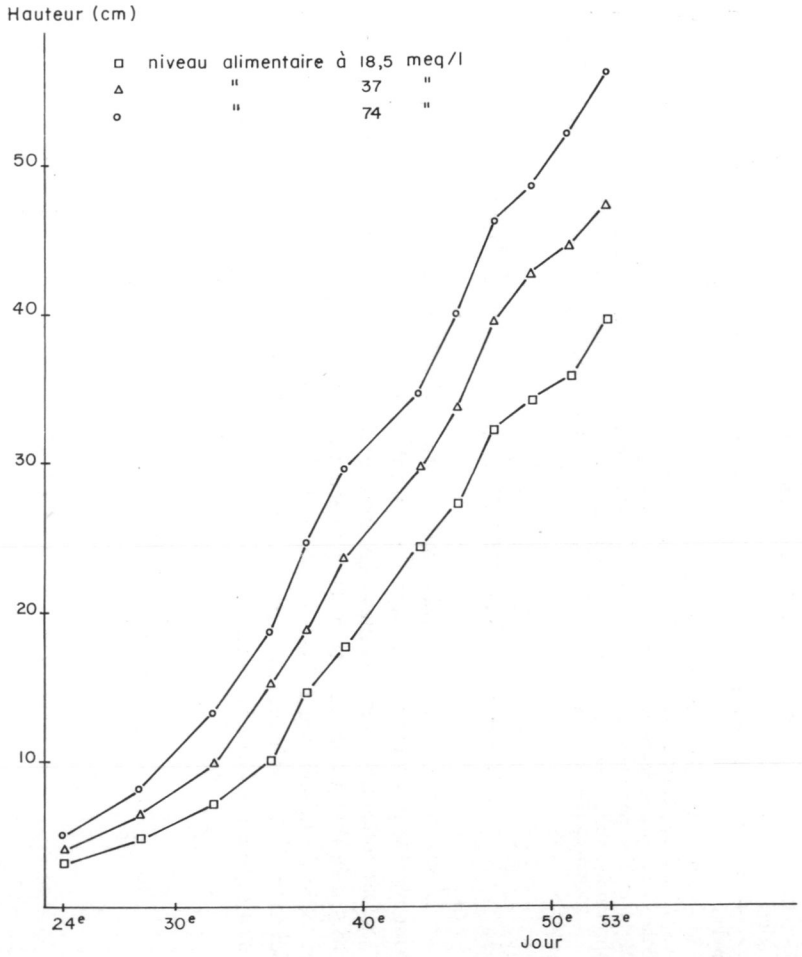


FIG. 3. — *Croissance en hauteur*

Il y a peu de différence entre les plantes des traitements II et III. Par contre, le développement des plantes alimentées à l'aide de la solution nutritive à 18,5 méq/l est nettement ralenti.

Le nombre d'étages formés en 53 jours est supérieur dans le cas du traitement III alors qu'il est identique pour le I et le II.

Les courbes de la figure 3 illustrent la croissance en hauteur des plantes.

L'effet des traitements est caractéristique : entre le 24e et le 53e jour, il existe une corrélation positive entre la hauteur des plantes et les concentrations des solutions nutritives.

V. — APPRÉCIATION DES RENDEMENTS

Les poids de la matière fraîche de la partie aérienne produite au moment de la première coupe (stade : début de la floraison) figurent au tableau 2.

On enregistre des variations importantes des indices à l'intérieur d'un même traitement, mais l'augmentation de production en fonction de l'augmentation de concentration de la solution est hautement significative.

TABLEAU 2

Production de matière fraîche à la première coupe (g/vase)
(partie aérienne)

Traitements	I		II		III	
Solutions nutritives à	18,5 méq/l		37 méq/l		74 méq/l	
Poids matière fraîche par vase	Vase n°		Vase n°		Vase n°	
	1	19,65	5	24,52	9	33,05
	2	19,32	6	34,78	10	40,90
	3	17,84	7	33,05	11	43,95
	4	17,50	8	26,25	12	42,89
Total par traitement		74,31		118,60		160,79
Moyenne par traitement	18,57		29,65		40,19	

Les différences à l'intérieur d'un même traitement s'accentuent à la 2e coupe, ce qui met en relief l'importance du comportement individuel des plantes vis-à-vis de conditions alimentaires identiques (tabl. 3).

L'augmentation de rendement, significative au seuil de probabilité de 1 p. 100 entre le premier et le second traitement, ne l'est plus entre le deuxième et le troisième.

TABLEAU 3

Production de matière fraîche à la 2e coupe (g/vase)
(partie aérienne)

Traitements	I		II		III	
Solutions nutritives à	18,5 méq/l		37 méq/l		74 méq/l	
	Vase n°		Vase n°		Vase n°	
Poids matière fraîche par vase	1	52,35	5	60,40	9	63,15
	2	50	6	102,20	10	82,85
	3	49,55	7	70,95	11	81,80
	4	44,50	8	69,70	12	84,40
Total par traitement		196,40		303,25		312,20
Moyenne 2e coupe	49,10		75,81		78,05	
Moyenne 1re coupe	18,57		29,65		40,19	
Accroissement moyen entre 1re et 2e coupes	30,53		46,16		37,86	

En prenant pour 100 les rendements de la première coupe, on enregistre lors de la seconde un gain de :

301 p. 100 pour le traitement I
255 p. 100 pour le traitement II
194 p. 100 pour le traitement III

L'effet positif d'une alimentation plus intensive a été atténué entre la première et la seconde coupe.

Lors de la deuxième coupe, les plantes entières furent récoltées et le poids des racines a été déterminé. Ces résultats figurent au tableau 4.

TABLEAU 4

Poids de la matière fraîche des racines (*g/vase*)

Traitements	I		II		III	
Solutions nutritives à	18,5 méq/l		37 méq/l		74 méq/l	
	Vase n°		Vase n°		Vase n°	
Poids matière fraîche par vase	1	90,55	5	110,7	9	95,6
	2	93,50	6	108,5	10	91,5
	3	89,40	7	117,4	11	105,1
	4	91,20	8	128,5	12	100,05
Total par traitement		364,65		465,1		392,25
Moyenne	91,16		116,27		98,06	

Le poids de matière fraîche du système radiculaire correspondant au traitement II est le plus élevé. Les écarts par rapport aux deux autres sont significatifs (1 p. 100).

Il a paru intéressant d'établir le rapport entre le poids des racines et celui de la partie aérienne des plantes, au moment de la récolte. Les indices qui s'y rapportent figurent au tableau 5.

TABLEAU 5

Poids de matière fraîche des parties aériennes et des racines
(2e coupe, moyenne par traitement)

Traitements	I	II	III
Poids partie aérienne	196,40	303,25	312,20
Poids des racines	364,65	465,10	395,25
Rapport $\frac{\text{partie aérienne}}{\text{racines}}$	0,538	0,652	0,789

Ce rapport augmente parallèlement aux concentrations des solutions nutritives, c'est-à-dire que la partie aérienne profite plus que le système radiculaire de l'accroissement de la richesse alimentaire du milieu. Ceci est conforme aux constatations de nombreux auteurs et notamment de DARROW (1939) dans le cas de *Poa pratensis*, mais il est intéressant de noter que cette évolution se trouve sous la dépendance de deux phénomènes distincts :

— accroissement régulier du poids de la partie aérienne ;

— accroissement, puis réduction du poids du système radiculaire, ce qui indique que la réponse de la plante à une alimentation insuffisante par un développement accru de son système radiculaire est limitée et qu'une réduction n'intervient qu'au niveau élevé des concentrations des solutions nutritives.

L'ensemble des observations effectuées en cours de végétation et la pesée des deux coupes et des racines, permettent d'affirmer que les plantes ont répondu par une précocité et une croissance accrues à l'élévation de concentration des solutions nutritives.

Cette évolution paraît particulièrement sensible lorsqu'on passe du niveau I au niveau II, le passage au niveau III ne procure plus qu'un faible accroissement des rendements alors que les quantités d'éléments mises à la disposition des plantes passent du simple au double et correspondent à une concentration quadruple du niveau le plus bas (I).

Compte tenu du fait que l'élément se trouvant au niveau le plus bas dans les solutions est l'azote, on pouvait supposer qu'au niveau II tous les éléments, sauf l'azote, se trouvaient déjà en quantité suffisante par rapport aux besoins de la plante. Le faible accroissement des rendements, observé lors du passage du niveau II au niveau III, serait alors dû essentiellement au supplément d'azote, dont les quantités présentes dans le milieu correspondent dès lors aux besoins.

Si cette hypothèse était exacte, les divers types d'analyses des plantes devraient être en mesure de rendre compte de cette situation, mais nous verrons qu'elle est insuffisante.

VI. — RÉSULTATS ANALYTIQUES

1. *Analyse globale de la matière sèche des feuilles et des racines*

Le tableau 6 reproduit l'ensemble des résultats. L'évolution des taux en fonction des traitements ne suit pas l'accroissement des concentrations d'une façon caractéristique.

Le manque de parallélisme entre la teneur des feuilles en N et P et les concentrations de ces éléments dans le milieu pourraient s'expliquer comme suit :

— l'azote : les plantes répondent à une élévation des disponibilités, davantage par un accroissement de la production de matière végétale que par des modifications de leur composition minérale ;

— le phosphore se trouve en excès par rapport au besoin à tous les niveaux, c'est pourquoi les taux atteignent le maximum déjà en I — les teneurs moyennes, selon BEESON (1941) seraient 0,35-0,53 p. 100 de matière sèche — et restent stationnaires en présence de quantités plus élevées de P en II et III.

Les teneurs en potassium des feuilles sont très élevées — BEAR et WALLACE (1950) situent le niveau supérieur à 1,40 p. 100 de matière sèche — et reflètent mieux les niveaux de l'alimentation en cet élément, principalement lors de la 2e coupe, alors que le calcium évolue en sens inverse. Cette apparente anomalie peut s'expliquer par l'intervention de deux phénomènes :

a) Au niveau de l'absorption, la plus grande mobilité des ions monovalents K^+ et Na^+ par rapport aux ions bivalents Mg^{++} et surtout Ca^{++} détermine une plus forte absorption des premiers en présence de solutions nutritives concentrées. Les quantités de cations disponibles sont supérieures, dans le milieu, à la capacité d'absorption de la plante, d'où compétition entre ions pour l'occupation des sites d'accueil et la prédominance des cations K^+ et Na^+ plus mobiles que Mg^{++} et Ca^{++}.

TABLEAU 6

Analyse des feuilles et des racines de Luzerne
(en g/p. 100 de matière sèche)

		Feuilles						Racines		
		1re coupe			2e coupe					
Niveaux		I 18,5 méq/l	II 37 méq/l	III 74 méq/l	I 18,5 méq/l	II 37 méq/l	III 74 méq/l	I 18,5 méq/l	II 37 méq/l	III 74 méq/l
Éléments	N	6,36	6,16	6,80	5,74	5,54	6,02	1,86	2,04	2,57
	P	1,04	0,98	0,99	0,76	0,71	0,81	0,88	1,18	1,29
	K.....	3,38	3,51	3,87	3,22	4,33	5,14	2,31	2,28	2,33
	Ca.....	1,22	1,33	0,98	1,22	1,07	0,86	0,22	0,36	0,56
	Mg.....	0,22	0,34	0,32	0,31	0,30	0,33	0,16	0,14	0,15
	Na	0,012	0,014	0,021	0,017	0,012	0,019	0,007	0,007	0,012

b) Le taux de Ca le plus élevé (1,33 p. 100 à la première coupe et au niveau III) doit être considéré comme très bas. FRIED et PEECH (1946) estiment que le niveau critique pour la luzerne, se situe au voisinage de 1,6 p. 100. Il est permis de supposer que, dans ces conditions, la croissance des plantes alimentées à l'aide de solutions à 74 méq/l a été freinée par une alimentation calcique insuffisante : déficience induite par excès de K.

L'effet dépresssif du potassium sur l'absorption du magnésium est moins marqué mais il parvient à masquer complètement l'accroissement des disponibilités en Mg dans les solutions les plus concentrées.

Ces diverses remarques ne peuvent être formulées avec certitude que grâce à la connaissance précise des conditions de l'alimentation.

En l'absence de telles informations, il serait difficile de définir l'action et le rôle des différents facteurs du milieu ayant contribué à la fixation de l'état minéral des plantes.

L'analyse des éléments totaux des racines fournit des indications intéressantes : le taux de Ca, nettement moins élevé que dans les feuilles, est cependant parfaitement relié au niveau de l'alimentation.

L'ensemble des éléments minéraux se trouve à un niveau plus bas dans les racines sauf en ce qui concerne le phosphore, ce qui confirme que P se trouve dans le milieu en excès par rapport aux autres éléments.

2. *Analyse des extraits frais des tiges et pétioles et des racines*

A. — *Essai de reproductibilité : 1re coupe.*

Les 4 répétitions du traitement II (à 37 méq/l) ont été analysées séparément. Le bulletin d'analyse n° 1 reproduit les résultats et fournit des indications concernant l'ampleur des variations susceptibles d'affecter le rendement et la composition chimique des plantes soumises au même traitement.

On constate des différences considérables de rendements, alors que la composition minérale des plantes est assez voisine.

Cependant, il y a lieu de noter que les rendements maximums correspondent aux teneurs les plus élevées en Ca et Mg. Les niveaux de P et de K sont très élevés.

B. — *A la 2e coupe.*

Les trois niveaux de l'alimentation avaient été établis en sorte que :

— le traitement I corresponde à une alimentation insuffisante,
— le traitement II soit au voisinage de la nutrition optimale,
— le traitement III dépasse les besoins des végétaux.

Le bulletin n° 2 donne les résultats par traitement, l'analyse précédente ayant fourni les renseignements nécessaires quant à la variabilité des taux à l'intérieur d'un même traitement. Les indices de développement représentent la moyenne, en grammes de la matière sèche (tiges + pétioles + limbes) des plantes des 4 vases du même traitement. Leur évolution suit l'augmentation des concentrations des solutions nutritives, mais d'une façon plus importante entre I et II qu'entre II et III. Ces indices indiquent que la nutrition des plantes recevant la solution à 18,5 méq/l (I) est, comme prévu, insuffisante pour leur assurer une croissance normale.

En prenant pour 100 la production moyenne de matière fraîche des plantes recevant le traitement I, on constate :

— une augmentation de 149 p. 100 pour les plantes du traitement II,

— une augmentation de 176 p. 100 pour les plantes du traitement III,

le niveau alimentaire II n'apparaît pas entièrement satisfaisant puisqu'il y a une certaine augmentation de poids de matière fraîche entre II et III.

L'analyse indique une évolution des taux dans le même sens que les concentrations des solutions nutritives.

a) *Nutrition azotée.*

Les teneurs en N (NO_3^-) augmentent déjà sensiblement entre I et II, mais entre II et III, elles se trouvent multipliés par 7, alors que les concentrations des solutions ne font que doubler. Cela prouve qu'il se produit une accumulation importante de cet anion dans les plantes.

Le niveau de N (NH_4^+) est pratiquement identique entre I et II, mais il franchit le niveau critique en III. Cet excédent pourrait provenir soit de la dégradation des protéines soit d'une utilisation insuffisante de l'azote réduit (ROUTCHENKO, 1967).

N (amidé + aminé) varie peu entre les traitements I et II, mais double entre II et III.

Pour *N (protéique)*, les résultats indiquent une tendance identique.

NST (azote soluble total). Son évolution est analogue à celle qui affecte les taux des diverses formes d'azote organique. Pour apprécier la nutrition minérale des plantes recevant les différents traitements, il suffit, dans le cas considéré, de se rapporter à l'évolution de N (NO_3^-).

On constate en effet que l'évolution est du même ordre pour les formes organiques et NH_4^+, alors qu'elle est nettement plus importante pour NO_3^-. Ce fait indique pour les plantes du traitement III, une absorption de N supérieure aux possibilités métaboliques des plantes.

Ces constatations sont confirmées par les variations du rapport Nm p. 100 NST (azote minéral p. 100 de l'azote soluble total) :

5,72 pour le traitement I,
11,00 pour le traitement II,
23,81 pour le traitement III.

Le fait que ce rapport évolue dans le même sens que les concentrations des solutions nutritives et les rendements indique que la croissance des plantes a été en partie contrôlée par les disponibilités en N et surtout par les possibilités des plantes d'utiliser l'azote absorbé, compte tenu des autres facteurs du milieu (ROUTCHENKO, 1965).

b) *Nutrition phosphorique.*

P ($PO_4H_2^-$). Les teneurs sont très élevées dans tous les traitements et évoluent en sens opposé à la concentration des solutions nutritives.

P (organique) (glucidique, nucléique, phytine). Taux élevés évoluant dans le même sens que les disponibilités du milieu en P.

PST (phosphore soluble total). Teneurs peu différenciées et très élevées. Le rapport Pm p. 100 PST (phosphore minéral p. 100 de phosphore soluble total) évolue

dans un sens opposé à celui des rendements et des concentrations des solutions. Ceci confirme que P est en excès par rapport aux besoins et aux possibilités des plantes de l'utiliser par voie d'intégration dans les substances organiques.

Pm p. 100 PST = 41,36 pour les plantes en I
36,79 — — II
30,90 — — III

c) *Nutrition en soufre.*

On peut faire les mêmes observations que pour le phosphore. Le rapport Sm p. 100 SST (soufre minéral p. 100 soufre soluble total) évolue en sens opposé à celui des rendements et des concentrations des solutions nutritives, mais d'une façon moins accusée que pour P.

Sm p. 100 SST = 8,81 pour les plantes au niveau I
8,68 — — — II
5,11 — — — III

La nutrition en S des plantes est par conséquent suffisante.

d) *Nutrition cationique.*

La somme des cations évolue parallèlement à la concentration des solutions nutritives, mais l'équilibre entre les cations reste pratiquement le même dans les trois traitements. Elle est caractérisée par un niveau très élevé en K et particulièrement bas en Ca, ce qui correspond à l'équilibre K/Ca des solutions nutritives.

Le rapport $\frac{K + Na}{Ca + Mg}$ dans les plantes est voisin de 30, alors qu'il se situe au voisinage de 10 dans la sève d'une luzerne dont la nutrition cationique est bien équilibrée (ROUTCHENKO, 1966 — non publié —). Les niveaux, peu variables et bas de Ca dans les sucs, indiquent que cet élément a contrôlé la croissance des plantes. L'antagonisme K/Ca se manifestant plus énergiquement au niveau des concentrations élevées des solutions nutritives, les plantes n'ont pas pu utiliser pleinement le supplément de Ca présent dans le milieu dans les traitements II et III.

VII. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les conclusions qu'il est possible de formuler, au vu des résultats de l'analyse globale portant sur la matière sèche des feuilles et des racines d'une part et sur les extraits frais des tiges et pétioles d'autre part, peuvent se résumer comme suit :

— *L'analyse globale* indique que la nutrition azotée a été bonne, que le niveau de Mg est suffisant et que les taux de K et P sont élevés, alors que les teneurs en Ca indiquent une insuffisance de l'alimentation calcique.

Ces conclusions se rapportent à l'ensemble des traitements et l'élévation des concentrations des solutions nutritives, passant de 1 pour le traitement I à 4 pour le traitement III, ne peut être déduite de la valeur des indices analytiques fournis par l'analyse globale des feuilles.

— *L'analyse des extraits frais* confirme dans ses grandes lignes le diagnostic

établi sur la base de l'analyse des feuilles et des racines, mais elle fournit en outre des renseignements sur la manière dont les plantes déficientes en Ca ont utilisé les autres éléments mis à leur disposition.

La figure 4 illustre l'évolution des indices métaboliques de N, P et S en fonction des traitements. Le sens de l'évolution de ces indices est significatif du rôle biologique de chacun d'eux. Suivant W. ROUTCHENKO (1967), lorsque l'un de ces indices évolue dans le même sens que le niveau de l'alimentation, et la production de matière végétale, il s'agit de l'élément qui contrôle la croissance, alors que les courbes évoluant en sens opposé se rapportent à des éléments se trouvant en excès par rapport aux besoins du végétal.

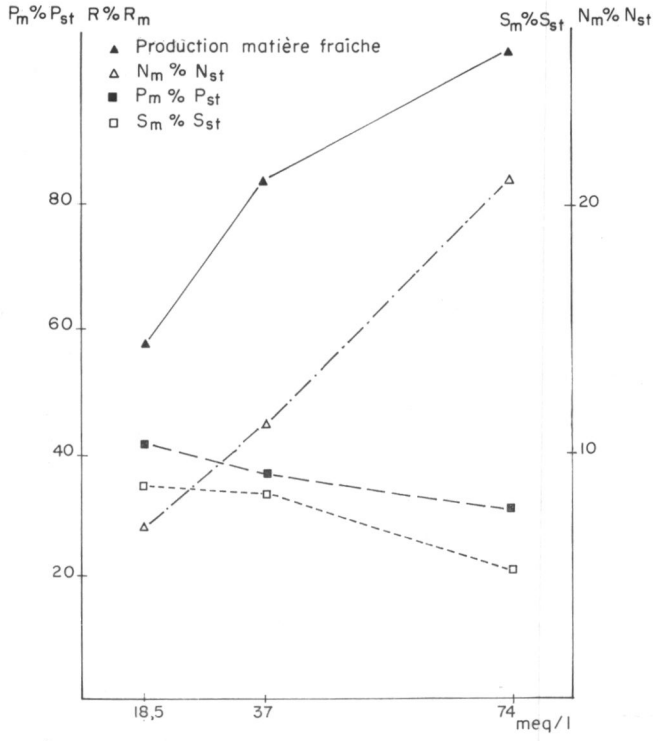


FIG. 4. — *Évolution des indices métaboliques et des rendements en fonction des traitements*

De l'examen de la figure 1, il ressort que la fourniture de l'*azote et surtout son organisation* ont joué un rôle important dans la croissance des plantes, alors que le phosphore et le soufre se trouvaient en excès par rapport aux besoins. Il est permis en outre de préciser, vu l'accumulation d'azote minéral et d'azote organique soluble dans les plantes en III, alors que l'accroissement de la production de matière fraîche est faible, que les plantes n'ont pas pu, à ce niveau, utiliser pleinement l'azote absorbé. Ce fait doit être rapproché de l'insuffisance en Ca. En effet, ses teneurs ne varient pas entre les trois traitements, alors que la somme des anions dans les sucs passe de 38,04 à 59,79 et celle des cations de 128,07 à 196,72 méq/l ; de plus, entre la première et la deuxième coupe, les concentrations de Ca^{++} dans les sucs diminuent de moitié alors que, compte tenu des niveaux de l'alimentation en Ca, elles devraient augmenter.

VII. — CONCLUSION

On constate que l'analyse globale portant sur les organes assimilateurs tout comme l'analyse des extraits des tissus conducteurs permettent de déceler des déficiences graves de l'alimentation.

La seconde de ces méthodes fournit en outre des informations sur les interactions suscitées et leurs conséquences au niveau du métabolisme.

Ainsi, elle facilite la mise en évidence du rôle qu'il convient d'attribuer à chacun des principaux éléments nutritifs dans la croissance de la plante considérée, en particulier en mettant en lumière les consommations de luxe.

Reçu pour publication en janvier 1969.

SUMMARY

THE CONTROL OF THE MINERAL NUTRITION OF PLANTS BY ANALYZING THE EXTRACTS OF THE CONDUCTING TISSUES WITH PARTICULAR REFERENCE TO LUCERNE

Lucerne is grown on sand and nutritive solutions of which the equilibrium is kept constant, but with increasing ionic concentrations. The aim of the experiment is to investigate the nutritive factor limiting the increase and accumulation of the ions absorbed in excess without profit to the plant.

The growth and development are appraised by biometric methods and weighing of plants, while the chemical state is ascertained by analysis of the leaf and of the sap extracted from the conducting tissues.

The results of the sap analysis make it possible to determine the biological role of each element and to estimate the accumulation, whether in ionic form or only partially metabolized, of the elements absorbed in excess in relation to the limiting factor.

ZUSAMMENFASSUNG

KONTROLLE DER MINERALISCHEN PFLANZENERNÄHRUNG MITTELS ANALYSE DER EXTRAKTE AUS LEITENDEN GEWEBEN ANWENDUNG FÜR DIE LUZERNE

Die Luzerne wird auf Sand und Nährlösungen angebaut, wobei das Gleichgewicht zwischen den Nährstoffen, aber für wachsende ionische Konzentrationen, konstant gehalten wird. Der Zweck dieser Untersuchung besteht darin, die Natur des wachstums beschränkenden Ernährungsfaktors, sowie die ohne Nutzen für die Pflanze im Uebermass aufgenommene Ionenanreicherung festzustellen.

Das Wachstum und die Entwicklung werden durch biometrische Mittel und durch Gewichtsbestimmungen der Pflanzen beurteilt, während der chemische Zustand mittels Analyse der Blätter und Analyse der aus den leitenden Geweben extrahierten Säfte bestimmt wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Analyse der Säfte die biologische Bedeutung jedes der Elemente zu definieren ermöglicht, ferner die Anhäufung, in ionisierter oder nur teilweise metabolisierter Form der im Vergleich zum Grenzelement im Ueberfluss aufgenommenen Elemente festzustellen gestattet.

РЕЗЮМЕ

Контроль минерального питания растений при помощи анализа вытяжек из проводящих тканей, в применении к люцерне.

М. КЛЕРОН, В. РУТЧЕНКО.

Люцерна возделывалась на песке или на уравновешенных питательных смесях в которых, при увеличивавшихся концентрациях ионов, поддерживалось постоянное соотношение элементов. Целью опыта было определение природы фактора питания ограничивавшего рост растений и накопление поглощенных в излишке и, без пользы для растения, ионов.

Рост растений и их развитие оценивались биометрическими способами и по весу растений, в то время как их химическое состояние определялось при помощи анализа сока проводящих тканей.

Результаты опыта указывают что с помощью анализа сока, возможно точно установить биологическую роль каждого элемента и констатировать накопление в форме ионов, или в только частично метаболизованной форме, элементов поглощенных в излишнем по отношению к ограничивающему элементу, количестве.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BEAR F. E.. WALLACE A., 1950. Alfalfa : The mineral requirements and chemical composition. *New Jersey Agric. exper Stn. Bull.* **748.**

BEESON K. C., 1941. The mineral composition of crops, with particular reference to the soils in which they were grown. A review of compilation. *U. S. Dept. Agric. Misc. Publ.*, **369**.

DARROW R. A., 1939. Effects of soil temperature, pH and nitrogen nutrition on the development of *Poa pratensis*. *Bot. Gas.*, **27**, 101-109.

DELAS J. 1964. Spectrophotométrie de flamme en milieu oxine. Application au dosage du calcium et du magnésium dans les sols et les végétaux. *Ann. agron.*, **15** (6), 633-649.

FRIED M., PEECH., M., 1946. The comparative effects of lime and gypsum upon plants grown on acid soils. *J. amer Soc. Agron.*, **38**, 614-623.

ROUTCHENKO W. ., 1965. Analyses non publiées.

ROUTCHENKO W., 1967. Appréciation du dynamisme de la nutrition minérale des plantes basée sur l'analyse des sucs extraits des tissus conducteurs. *Ann. agron.*, **18**, (4), 361-402.

SCHEIDECKER D., 1968. Étude d'une carence induite en calcium observée chez la Tomate *Groseille rouge* cultivée sur des milieux relativement riches en K^+ et pauvres en Ca. *Rev. Pot.*, Sect. 3.

ANNEXE

BULLETIN D'ANALYSE N° I

Première coupe

Espèce et variété: Medicago media PERS *type* Poitou

Stade de développement: floraison. Organes de référence: tiges, pétioles
Niveau moyen de concentration de la solution nutritive : 37 méq/l

Référence échantillons	Vases : 1		2		3		4	
Ind. de croissance Poids matière fraîche	24,52		34,78		33,05		26,25	
Éléments	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l
Azote NO_3^-	284	20,28	280	20	246	17,57	384	27,42
Azote NH_4^+	—		—		—		44	3,14
Azote aminé + amidé.	672		840		640		768	
Azote protéique	272		256		224		216	
Azote soluble total	1 228		1 376		1 110		1 412	
Phosphore $PO_4H_2^-$	354	11,41	355	11,45	384	12,38	364	11,74
Phosphore glucidique	254		221		272		252	
Phosphore pptp/alcool	604		736		684		644	
Phosphore soluble total	1 212		1 312		1 340		1 260	
Soufre SO_4^{--}	37	2,31	41	2,56	47	2,93	40	2,5
Soufre soluble total	302		289		296		304	
Chlore : Cl^-	624	17,60	576	16,24	567	15,99	510	14,38
Σ des anions		51,60		50,25		48,87		56,04
K^+	6 130	157,17	5 820	149,23	6 208	159,17	5 975	153,70
Ca^{++}	40	2,0	45	2,25	65	3,25	45	2,25
Mg^{++}	60	5,0	76	6,25	106	8,71	57	4,68
Na^+	156	6,78	160	6,95	192	8,34	304	13,21
Σ des cations $NH_4^+K^+Ca^{++}Mg^{++}Na^+$		170,95		164,68		179,47		173,34
Σ d. cations/Σ d. anions		3,31		3,27		3,67		3,14
K^+ % Σ cations		91,93		90,61		88,68		86,80
Ca^{++} % Σ cations		1,16		1,36		1,81		1,27
Mg^{++} % Σ cations		2,92		3,79		4,83		2,65
Na^+ % Σ cations		3,96		4,22		4,64		7,48
NH_4^+ % Σ cations								
K^+/Mg^{++}	100,08		76,58		58,56		104,82	
Nm % NST	23,12		20,34		22,16		27,19	
Pm % PST	29,20		27,50		28,65		28,88	
Sm % SST	12,25		14,18		15,87		13,15	
NST/PST	1,01		1,04		0,82		1,12	
PST/SST	4,01		4,53		4,52		4,14	
Ca précipité par alcool	400		412		400		416	

ANNEXE

BULLETIN D'ANALYSE N° II

2e Coupe

Espèce et variété: Luzerne type Poitou. *Stade de développement: début floraison*
Organes de référence: tiges et pétioles
Échantillons prélevés les 14, 16, 17 juin provenant de la serre d'Agronomie du C. R. A. S. O.

Référence échantillons	18,5 méq/l		37 méq/l		74 méq/l			
Ind. de croissance	94,05		140,65		166,35			
Éléments	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l
Azote NO_3^-	28	2	72	5,14	424	30,28		
Azote NH_4^+	22	1,57	28	2	54	3,85		
Azote aminé + amidé.	544		521		1 095			
Azote protéique	280		288		434			
Azote soluble total	874		909		2 007			
Phosphore $PO_4H_2^-$ ..	900	29,05	880	28,38	712	22,96		
Phosphore glucidique.	188		280		204			
Phosphore pptp/alcool	1 088		1 232		1 384			
Phosphore soluble total	2 176		2 392		2 300			
Soufre SO_4^{--}	32	2	37	2,31	25	1,55		
Soufre soluble total ..	362		426		489			
Chlore : Cl^-.....	177	4,99	177	4,99	177	4,99		
Σ des anions		38,04		40,82		59,79		
K^+	4 600	117,94	5 600	143,59	7 050	180,76		
Ca^{++}	20	1,00	26	1,35	28	1,40		
Mg^{++}	37	3,04	60	4,93	67	5,5		
Na^+	104	4,52	115	5	120	5,21		
Σ des cations $NH_4^+K^+Ca^{++}Mg^{++}Na^+$		128,07		156,87		196,72		
Σ d. cations/Σ d. anions		3,36		3,84		3,29		
K^+ % Σ cations....		92,09		91,53		91,88		
Ca^{++} % Σ cations....		0,78		0,86		0,71		
Mg^{++} % Σ cations....		2,41		3,14		2,79		
Na^+ % Σ cations....		3,52		3,18		2,64		
NH_4^+ % Σ cations....		1,22		1,27		1,95		
Nm % NST	5,72		11		23,81			
Pm % PST	41,36		36,79		30,90			
Sm % SST	8,81		8,68		5,11			
NST/PST	0,40		0,38		0,87			
PST/SST	5,99		5,61		4,70			

Ann. agron. 1969,, **20** (2), 217-218.

CHRONIQUE DES LIVRES

ELHAÏ H. — BIOGÉOGRAPHIE. — Paris, Libr. A. Colin, Coll. U, série « Géographie », 1968, 406 p.

L'auteur étudie tout d'abord les relations qui existent entre les plantes, les animaux et le milieu au sein duquel ils se développent, au cours d'une première partie composée des chapitres suivants : les organismes vivants et le climat actuel (lumière, température, eau, vent) ; le sol, milieu vivant et support de la végétation ; le climat, notion d'équilibre biogéographique ; le facteur biotique dans la répartition des végétaux et des animaux ; le poids de l'Histoire dans la composition et la physionomie des paysages végétaux.

Une seconde partie est consacrée aux grands ensembles physionomiques à la surface du globe, aux types de sols qui évoluent dans les mêmes conditions, et à la vie animale sous leur dépendance : les formations végétales fermées ; les formations végétales ouvertes (steppes, déserts, toundras) ; la végétation du bord des eaux ; la végétation, la vie animale et les sols dans les montagnes ; le problème des limites entre les formations végétales ; la représentation cartographique de la végétation.

Chaque chapitre est complété de références bibliographiques (ouvrages et articles) qui précisent tel ou tel point et donnent l'état des questions.

Un index des noms d'auteurs et un index biogéographique complètent utilement l'ouvrage.

CENTRE D'ÉTUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES, MONTPELLIER. — CODE POUR LE RELEVÉ MÉTHODIQUE DE LA VÉGÉTATION ET DU MILIEU. PRINCIPES ET TRANSCRIPTIONS SUR CARTES PERFORÉES (rédigé et publié sous la direction de L. EMBERGER). — Paris, C.N.R.S., 1968, 292 p.

Le Centre d'études phytosociologiques et écologiques au cours de ses travaux a rapidement ressenti le besoin d'une normalisation et il a été conduit à prévoir la codification des relevés d'inventaire écologique de la végétation. Parallèlement, le traitement électronique des observations écologiques a été largement développé. Un premier essai d'utilisation de cartes mécanographiques a été fait en Sologne en 1959 ; il a permis de mettre en évidence les groupes écologiques statistiquement vérifiés.

A partir de la fin de l'année 1964, les perspectives ouvertes par les nouveaux ordinateurs ont permis d'envisager la mise en chantier d'une deuxième approximation du code dont l'aboutissement est cet ouvrage.

Le plan du code est le suivant :

1. Le relevé d'inventaire écologique de la végétation, par M. GODRON.
2. L'identification du relevé et les caractères régionaux et climatiques, par M. GODRON.
3. L'occupation de la Station, par Ph. DAGET, M. GODRON, G. LONG et J. POISSONET.
4. L'analyse phytosociologique de la végétation, par L. EMBERGER, M. GODRON, E. Le FLOC'H et Ch. SAUVAGE.
5. Les caractères externes du substrat de la végétation, par Ph. DAGET.
6. L'étude édaphique, par J.-P. WACQUANT.
7. La transcription sur cartes perforées, par M. GODRON.

DUCHAUFOUR Ph. — L'ÉVOLUTION DES SOLS : ESSAI SUR LA DYNAMIQUE DES PROFILS. — Paris, Masson, 1968, 94 p.

Sans parler de ses nombreux articles scientifiques, l'auteur est déjà bien connu par les deux éditions de son Précis de Pédologie, chez le même éditeur. Le présent ouvrage est précisément né du désir d'apporter une mise à jour rapide à la deuxième édition. Depuis sa parution (1965), la Pédologie a réalisé en effet des progrès substantiels qui, sans modifier les grandes lignes des connaissances acquises, améliorent considérablement notre compréhension de la genèse des profils. C'est ce point particulièrement important, et celui-ci seulement, qui est traité dans L'*Évolution des Sols*. Cette limitation stricte de l'objet du livre entraîne deux conséquences :

1. Elle suppose connues par le lecteur les données essentielles de la physico-chimie et de la

génétique des sols. Il ne peut donc être lu avec profit que par ceux qui ont des connaissances préalables au moins sommaires ;

2. l'intérêt même du volume dans le domaine où s'est volontairement limité son auteur s'en trouve, par contre, renforcé puisqu'aucune considération annexe ne vient rompre ou alourdir la présentation des arguments et leur développement logique.

Après une première partie consacrée à l'étude générale du cycle biologique et à l'évolution des argiles, des éléments minéraux et de la matière organique, une seconde partie traite de l'évolution des grandes catégories de sols : sols humifères à complexe désaturé (rankers, andosols), sols humifères à complexe saturé (sols isohumiques, vertisols), sols calcaires, sols de climats tempéré et froid (sols bruns, lessivés, podzoliques), sols hydromorphes, sols de climat chaud (fersiallitiques et ferrallitiques), sols sodiques.

Dans la conclusion, le problème des classifications est abordé et trois grandes classifications, française, américaine et soviétique, sont rapidement discutées et comparées.

Ce livre, appuyé sur une documentation française et étrangère très importante, s'efforce avant tout de placer l'évolution des profils dans un vaste contexte écologique (végétation, climat, roche-mère, durée d'évolution, etc.). Il ne s'agit donc pas d'un ouvrage aride, intéressant pour les seuls spécialistes mais précieux également pour tous ceux qui s'intéressent au milieu naturel : Botanistes, Forestiers, Agronomes. Pour les Pédologues de stricte obédience auxquels la quantité croissante de documentation rend difficile un maintien à jour de leurs connaissances dans tous les domaines, cet ouvrage est un excellent moyen de se mettre au courant des données les plus récentes, avec la facilité incontestable qu'offre toujours une présentation ordonnée, synthétique et critique préparée par un excellent spécialiste.

M. B.

COLLOQUE SUR LA FERTILITÉ DES SOLS TROPICAUX, TANANARIVE, 19-25 NOVEMBRE 1967. — Paris, I. R. A. T. (Institut de Recherches agronomiques tropicales et des Cultures vivrières), 2 vol., 1968, 2237 p.

Sur invitation du Gouvernement Malgache et sous le patronage de l'Organisation commune des États Africains et Malgache, s'est tenu à Tananarive, du 19 au 25 novembre 1967, un Colloque sur la fertilité des Sols tropicaux.

Cent soixante treize communications furent présentées se répartissant entre six thèmes particuliers :

1. Théories scientifiques de la fertilisation des sols. Méthodologie en cette matière ;
2. Effets de la fertilisation minérale sur la production agricole en milieu tropical. Effets des facteurs autres que chimiques sur la fertilité des sols tropicaux ;
3. Problèmes agronomiques nouveaux pouvant résulter de l'emploi de la fertilisation dans le cadre de systèmes de culture plus intensifs ;
4. Aspects économiques et financiers de l'utilisation des engrais ;
5. Aspects humains de la vulgarisation des techniques de fertilisation ;
6. Orientations futures des travaux de la Recherche en matière de fertilisation.

Quelles qu'aient été les méthodes suivies et les interprétations données, il a été unanimement reconnu la possibilité d'accroître considérablement la productivité de nombreux sols tropicaux réputés peu fertiles et ceci pour la quasi-totalité des espèces cultivées. Cette constatation est importante dans l'optique de la sédentarisation des cultures et de l'intensification de l'agriculture.

Les conclusions insistent sur deux recommandations essentielles de l'utilisation généralisée des engrais par les agriculteurs (action de masse) :

— création de systèmes d'agriculture comportant une succession de cultures annuelles de subsistance et de vente ;

— application simultanée des autres techniques d'amélioration (emploi d'un matériel végétal amélioré, action sur les caractéristiques physiques du sol, techniques culturales, protection contre les maladies et les parasites...).

En dehors des possibilités d'orientation nouvelles pour la recherche, il se dégage des conclusions générales le souhait d'attirer l'attention :

— des gouvernements intéressés et des organisations internationales sur la place de l'amélioration de la fertilité des sols dans le développement de l'économie agricole et sur les mesures susceptibles d'en favoriser l'essor ;

— des organismes et services de développement, sur la signification de la fertilisation en tant que facteur de progrès et sur les conditions de son efficacité dans le cadre des actions dont ils sont chargés ;

— des producteurs et distributeurs d'engrais et des réseaux de distribution sur le rôle primordial qu'ils peuvent être appelés à jouer dans cette perspective.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seuel, ment. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de, et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatres langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals,* ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc., doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la publication: M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 6-1969

Dépôt légal: 2e trimestre 1969. N° d'impression: 569.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 20 1969 NUMÉRO 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

Ann. agron., 1969, **20** (3), 225-244.

QUELQUES ASPECTS DE LA DISTRIBUTION DU PHOSPHORE EN SOL CALCAIRE

A.-P. CONESA

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, 84 - Montfavet
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Le phosphore lié aux fractions granulométriques, aux matières organiques et aux principaux minéraux des sols calcaires a été étudié. Nous avons pu vérifier le rôle privilégié de la calcite.

I. — INTRODUCTION

L'étude de la dynamique du phosphore a permis de constater des phénomènes d'immobilisation irréversible des engrais phosphatés solubles apportés aux sols calcaires (RADET, 1962). Afin de les expliquer, de nombreux auteurs ont examiné le comportement du phosphore en présence des différents minéraux de ces sols, à partir de systèmes simples : carbonate de calcium (BOISCHOT et *al.*, 1949 ; ARVIEU, 1967), phosphates calciques (SCHOEN, BARBIER et HÉNIN, 1954), oxyde d'aluminium et de fer (MULJADI, POSNER et QUIRK, 1966), argile (BARBIER, 1949 ; GOLDSZTAUB, HÉNIN et WEY, 1954 ; BLANCHET, 1960), mis en contact de solutions de concentrations variées en phosphates et en calcium. Partant de modèles simplifiés, cette méthode d'approche permet de mettre en évidence les mécanismes qui déterminent les phénomènes dans le sol, système plus complexe. Elle apparaît indispensable, mais soulève une objection ; les protocoles expérimentaux adoptés (rapport sol-solution, concentration en phosphates), ne correspondent pas exactement aux conditions du milieu naturel.

Adoptant une démarche inverse, nous avons, à partir de sols calcaires recevant des apports de superphosphate depuis plusieurs années, tenté d'analyser le rôle de

différents facteurs du milieu dans la rétention de l'acide phosphorique : taille des particules, matières organiques, nature des constituants minéraux, et tout particulièrement du carbonate de calcium. Nous pourrons ainsi comparer l'évolution du phosphore en sol calcaire avec les résultats obtenus à partir de modèles simplifiés.

Pour désigner l'acide phosphorique provenant de l'engrais, retenu par les diverses fractions, nous utiliserons l'expression phosphore lié qui ne préjuge pas de la nature des liaisons, de divers types, qui peuvent être mises en jeu dans les fractions organiques et minérales que nous avons obtenues.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. *Matériel expérimental*

Compte tenu de l'objet de notre étude, nous avons choisi un éventail varié de sols calcaires. Afin de compléter les données du tableau 1, précisons que :

TABLEAU I

Caractères des Sols

Sols	Granulométrie					M.O. (%)	Calcaire total (%)	pH KCl	Acide phosphorique Joret-Hébert p.p.m. de P_2O_5
	Argile (%)	Limon (%)	Sable fin (%)	Sable moyen (%)	Sable grossier (%)				
Onjon T (0-20 cm)	22,2	38,5	16,8	8,3	10,4	3,30	70,40	7,6	80
Onjon Pe (0-20 cm).	18,5	42,8	16,3	8,0	11,8	3,31	70,40	7,5	145
St-Paul T (40-60 cm)	24,0	41,0	19,7	11,2	1,1	1,43	38,43	7,5	10
St-Paul Pe (0-12 cm)	25,0	41,2	16,3	9,6	3,1	2,98	37,14	7,5	135
Civray T (0-20 cm)..	32,0	16,5	11,8	9,4	24,2	2,70	1,70	7,2	60
Civray Pe (0-20 cm)..	26,8	14,7	12,0	10,1	31,3	3,50	2,50	7,2	290
Chartrouse T et Pe (40-60 cm)	0,5	2,5	2,5	25	71,5	0,10	27,20	8,0	10 et 910
Bouzigues (0-12 cm)	24,3	16,0	12,9	16,8	26,1	1,97	53,80	7,5	130
Saint-Martin-de-Hinx T (0-20 cm) .	13,2	14,8	14,4	22,8	31,6	2,03	—	5,5	10
Saint-Martin-de-Hinx Pe (0-20 cm)	13,0	15,5	14,5	20,1	33,6	2,16	—	5,8	90

Les « sols » (1) de grande culture d'Onjon (reposant sur la craie blanche du Crétacé de la Champagne crayeuse), de Saint-Paul (formés sur les alluvions récentes de la Durance), et de Civray (repo-

(1) Pour des raisons d'unité de présentation, nous utilisons la dénomination « sol » pour l'ensemble des échantillons, bien que, dans certains cas, ces échantillons ne représentent que la couche arable.

sant sur le Jurassique supérieur de la Champagne berrichonne), ont reçu respectivement des apports annuels de 140, 150 et 100 unités à l'hectare d'acide phosphorique (sous forme de superphosphate), depuis 6, 10 et 14 ans.

Le sous-sol très grossier de Chartrouse et le sol de Bouzigues présentent une constitution minéralogique originale :

le sous-sol de Chartrouse (alluvions récentes du Rhône), possède une gamme très large de minéraux. N'ayant pas pour ce sol d'échantillons enrichis au champ, nous avons incorporé au témoin une forte quantité de superphosphate (2,3 g de P_2O_5 par kg de terre), puis, en laboratoire, le sol a été soumis à une série d'humectations et de séchages qui a duré un an. Après ce « vieillissement » de l'engrais, le sol a été étudié comme les précédents.

Le sol de Bouzigues s'est formé sur des dépôts miocènes du Bas-Languedoc. GÈZE (1940) et SIGE (1966), ont décrit ces remplissages riches en phosphates naturels.

Le « sol » de grande culture de Saint-Martin-de-Hinx (sol de boulbène des Landes), auquel étaient incorporées 120 unités d'acide phosphorique à l'hectare depuis 20 ans, nous servira de *référence* pour les sols acides.

Nous appelons T les échantillons provenant des parcelles témoins et Pe les échantillons prélevés dans les parcelles enrichies.

2. *Méthodes*

Séparation granulométrique.

Nous avons séparé les cinq fractions granulométriques :

Argile	< 2 µ
Limon	2- 20 µ
Sable fin	20- 50 µ
Sable moyen	50-200 µ
Sable grossier	> 200 µ

Étant donné l'objet de notre étude, nous n'avons pas réalisé de destruction de la matière organique qui aurait provoqué une forte redistribution du phosphore dans les fractions granulométriques. De même, nous n'avons pas procédé à une décalcification du sol avant la dispersion.

La dispersion a été obtenue à l'aide de NH_4OH à partir de 30 grammes de sol. Cette méthode de dispersion n'est pas pleinement satisfaisante et nous avons pu constater une solubilisation du phosphore supérieure à celle d'un traitement à l'eau (tabl. 2).

TABLEAU 2

Phosphore dissous par les solutions dispersantes
(en p.p.m. de P_2O_5 après six dispersions successives)

Sols	Eau		NH_4OH						
	St-Paul Pe	Bouzigues	St-Paul T	St-Paul Pe	Chartrouse T	Chartrouse Pe	Civray T	Civray Pe	Bouzigues
p.p.m. de P_2O_5 extrait	31,5	35,5	16,2	76,2	5.0	86,0	46,3	125,3	386,0

Enfin, le prélèvement des particules de tailles différentes a été effectué par siphonage et les fractions granulométriques obtenues séchées sous vide à 60°C avant d'être étudiées ; c'est-à-dire qu'une partie du phosphore dissous par la solution dispersante s'est retrouvé dans ces fractions.

Séparation des matières organiques.

Le fractionnement de la matière organique libre et liée a été réalisé selon la méthode MONNIER *et al.* (1962) : 10 grammes de sol broyés et tamisés à 500 µ étaient placés dans un tube de centrifugeuse rempli d'un liquide densimétrique (mélange bromoforme-alcool, de densité 1,80). Après centrifugation, on recueillait le surnageant contenant la matière organique « libre » et le culot de centrifugation où se trouvait la matière organique « liée » aux constituants minéraux.

Le phosphore organique a été évalué par double extraction (ERABI, 1966). Le phosphore était extrait par SO_4H_2 0,5 N et FNH_4 2 p. 100 sur deux échantillons du même sol, dont un était traité au préalable par calcination de deux heures à 400°C au four à moufle pour détruire la matière organique. La différence de teneur en phosphore des deux traitements donnait le phosphore organique.

Séparation des minéraux du sol.

A l'aide de liqueurs denses et par électromagnétisme, on a séparé les différents minéraux du système sol. Ces méthodes pétrologiques ne peuvent cependant être employées que sur des particules suffisamment grosses ($> 50\ \mu$); en dessous de cette taille, on ne peut réaliser une séparation correcte. Afin d'éviter une trop grande hétérogénéité dans la taille des particules, nous avons choisi l'intervalle granulométrique 50-200 μ. Cette fraction granulométrique présentait en outre, comme nous le verrons, l'avantage d'être pauvre en phosphore organique.

Liqueurs denses.

Après avoir éliminé l'emploi des liqueurs de Thoulet (Iodomercurate de K) et de Rorbach (Iodomercurate de Ba), qui provoquaient une légère attaque des minéraux en surface (chlorite en particulier), nous avons finalement choisi le bromoforme, de densité = 2,89, qui, dilué dans l'alcool, nous a permis de séparer plusieurs lots caractérisés par leur densité :

2,20-2,62 contient les feldspaths potassiques,
2,62-2,70 correspond aux densités du quartz et des feldspaths calco-sodiques,
2,70-2,89 cet intervalle de densité est théoriquement celui de la calcite.

Pour les densités supérieures à 2,89, nous avons utilisé l'iodure de méthylène, l'intervalle :

2,89-3,33 est celui où se trouvent biotite, apatite ;
les densités $>$ 3,33 correspondent à celles de minéraux lourds et en particulier des oxydes de fer.

Ces densités étaient contrôlées à l'aide de minéraux tests.

Triage magnétique des minéraux.

Dans les sols de Chartrouse et de Saint-Paul-Rizière, nous avons constaté l'existence de particules retenues par un aimant. L'électro-aimant pour minéralogie Beaudoin, nous a permis de trier ces particules.

La nature des différents lots minéraux obtenus a été contrôlée :

— par un examen au microscope polarisant. Pour la fraction sableuse, nous avons procédé à des inclusions dans une résine à partir desquelles nous avons fabriqué des plaques minces qui ont servi à l'observation ;
— par diffraction des rayons X (examen des poudres par la méthode Debye et Scherrer) nous avons pu identifier les principaux constituants cristallins des fractions.

Attaque progressive par HCl 0,1 N.

Elle nous a permis d'étudier la localisation du phosphore dans la masse du granule de calcite. 1 g de sable de calcite 50-200 μ a été placé dans une allonge large, de façon à constituer un « lit » peu épais permettant une attaque acide homogène de la calcite. Cette dernière a été soumise à une série de 10 percolations successives par 10 cm³ d'HCl 0,1 N. Sur les percolats sont dosés phosphore et calcium. Le rapport P_2O_5/Ca représente les quantités d'acide phosphorique dissoutes (en γ de P_2O_5) par unité de CO_3Ca détruite (exprimée en mg de Ca).

Le phosphore total a été évalué après une double attaque nitroperchlorique des échantillons finement broyés. Le dosage du phosphore était effectué selon la méthode DUVAL (1964).

III. — RÉSULTATS

1. *Phosphore et fractions granulométriques*

Après séparation des différentes fractions granulométriques, nous avons dosé le phosphore total des lots obtenus et évalué, par attaque chlorhydrique, leur pourcentage en CO_3Ca.

Les figures 1 et 2, représentent les quantités de phosphore total exprimé en p.p.m. de chaque fraction. Les parties hachurées représentent les teneurs de l'échantillon non enrichi. La partie en blanc représente le phosphore incorporé au sol qui s'est retrouvé sur cette fraction. Nous supposons que la parcelle témoin et la parcelle enrichie sont parfaitement homogènes et présentaient rigoureusement les mêmes teneurs en acide phosphorique au départ. Cela est vrai pour le sol de Chartrouse enrichi en laboratoire ; pour les échantillons enrichis aux champs, notre hypothèse est approximative. Le tableau 1 montre que les sols témoins et enrichis ne sont pas rigoureusement identiques. Elle nous permet cependant d'apprécier comment s'est distribué, dans des conditions naturelles, le phosphore soluble apporté au sol. Pour tous les sols, la fraction la plus fine $< 2\ \mu$ fixe les plus fortes quantités de phosphore ; cependant, dans les sols calcaires, les fractions sableuses grossières jouent un rôle plus important que dans le sol acide. C'est ainsi que la quantité de phosphore provenant du superphosphate qu'on retrouve liée à l'argile est cent fois plus forte que celle liée à la fraction sableuse 50-200 μ pour le sol acide de Saint-Martin-de-Hinx. Ces proportions ne sont que de 10 pour le sol de Civray et de 20 pour le sol calcaire d'Onjon.

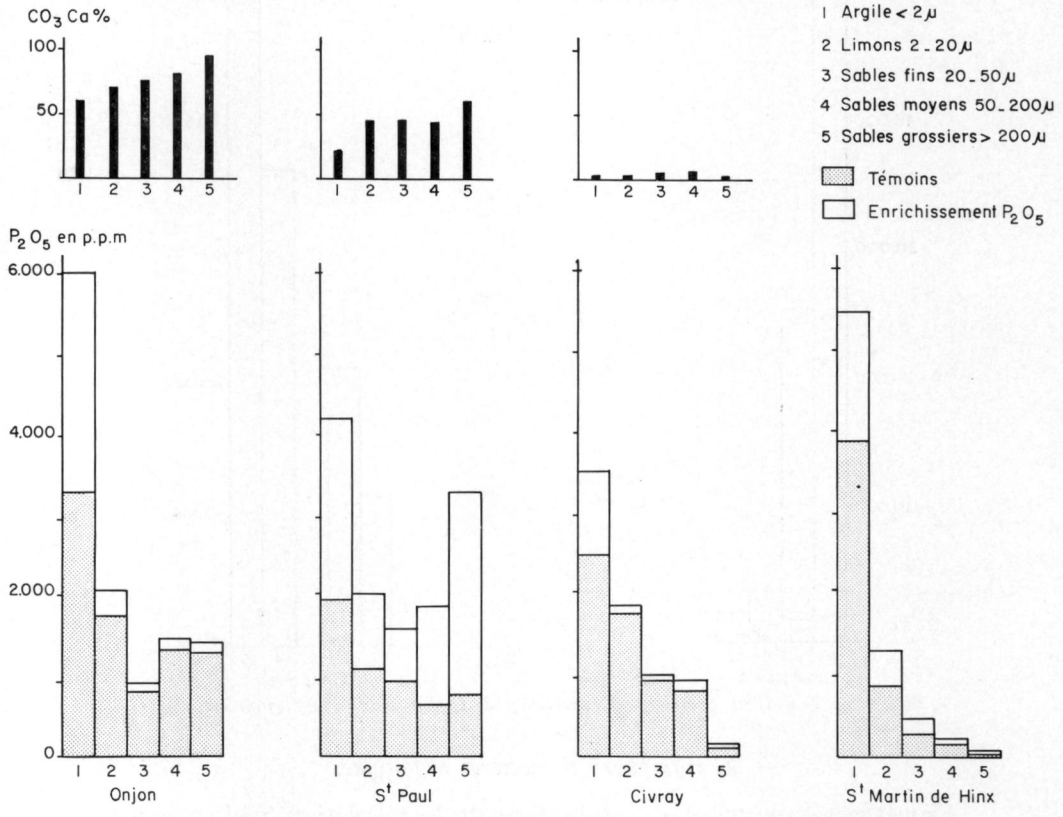


FIG. 1. — *Teneurs en phosphore et pourcentage de CO_3Ca des fractions granulométriques*

Notons l'allure particulière du diagramme obtenu pour le sol de Bouzigues, qui montre des quantités croissantes d'acide phosphorique avec la taille des particules.

En comparant les teneurs globales en acide phosphorique du sol avec celles calcu-

lées à partir des différentes fractions granulométriques, on apprécie l'erreur introduite par le fractionnement. On obtient des écarts variant de 1,5 à 13 p. 100 (tabl. 3).

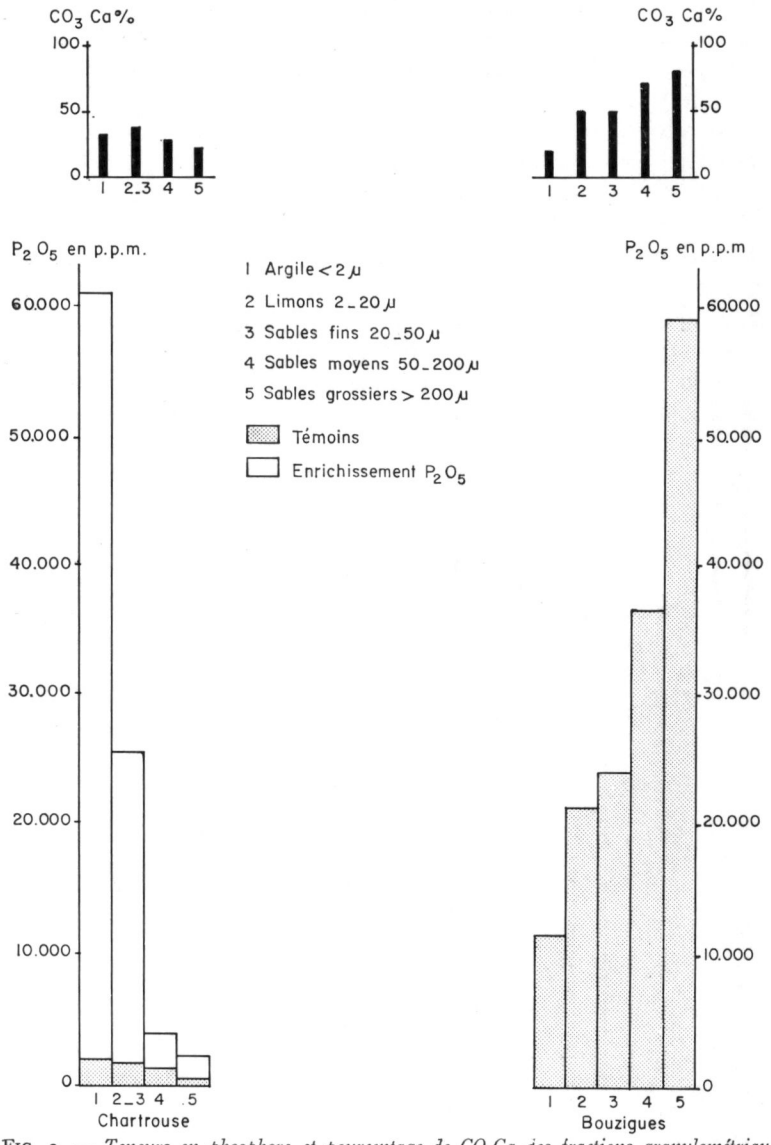


FIG. 2. — *Teneurs en phosphore et pourcentage de CO_3Ca des fractions granulométriques*

2. *Phosphore et matières organiques*

La méthode MONNIER et *al.*, a été utilisée sur les sols entiers (tabl. 4), et pour les différentes fractions granulométriques du sol Saint-Paul T et Pe (tabl. 5).

Sur le tableau 4, on constate que le phosphore organique peut représenter une fraction importante du phosphore total. Le sol de Chartrouse possède une quantité faible de phosphore organique, alors que le sol d'Onjon contient 77 p. 100 des réserves

TABLEAU 3

Erreurs apparentes introduites par la séparation granulométrique

Sols	P_2O_5 total du sol calculé à partir des fractions P_1	P_2O_5 trouvé par dosage direct du sol P_2	Différence $P_1 - P_2$	$\frac{(P_1 - P_2) \times 100}{P_2}$
Onjon T	1 870	1 658	212	12,7
Onjon Pe	2 668	2 508	160	6,3
Saint-Paul T	1 255	1 160	95	8,1
Saint-Paul Pe	2 623	2 345	278	11,8
Civray T	1 481	1 351	130	9,6
Civray Pe	1 750	1 650	100	6,0
Chartrouse T	702	740	— 38	— 5,1
Chartrouse Pe	3 464	3 272	192	5,8
Bouzigues	30 430	30 900	— 470	— 1,5
Saint-Martin-de-Hinx T	699	660	39	5,9
Saint-Martin-de-Hinx Pe	1 058	1 006	52	5,1

TABLEAU 4

Phosphore organique « libre » et « lié » dans les différents sols

Sols	P_2O_5 de matière organique « liée » en p.p.m. de P_2O_5	P_2O_5 de matière organique « libre » en p.p.m. de P_2O_5	P_2O_5 organique total en p.p.m. de P_2O_5	P_2O_5 organique en % du P_2O_5 total
Onjon T	1 275	17	1 292	77
Onjon Pe	1 215	8	1 223	49
Saint-Paul T	380	24	404	35
Saint-Paul Pe	700	29	729	31
Civray T	475	13	488	36
Civray Pe	408	22	430	26
Chartrouse T	20	—	20	3
Chartrouse Pe	23	—	23	—
Bouzigues	520	53	573	2
Saint-Martin-de-Hinx T	300	7	307	46
Saint-Martin-de-Hinx Pe	350	5	355	35

de phosphore total sous forme organique. Pour l'ensemble des échantillons, les teneurs en phosphore organique « libre » sont faibles.

Le tableau 5, où figurent les résultats du fractionnement du phosphore organique, montre que la phase « liée » se trouve essentiellement dans la fraction fine < 2 μ et dans le limon (2-20 μ) et la phase « libre », au contraire, dans les fractions grossières, comme on pouvait s'y attendre.

TABLEAU 5

Teneurs en phosphore organique « libre » et « lié » des différentes fractions granulométriques
(en p.p.m. de P_2O_5 de la fraction)

Fractions	Saint-Paul T					Saint-Paul Pe				
	Argile < 2 μ	Limon 2-20 μ	Sable fin 20-50 μ	Sable moyen 50-200 μ	Sable grossier >200 μ	Argile < 2 μ	Limon 2-20 μ	Sable fin 20-50 μ	Sable moyen 50-200 μ	Sable grossier >200 μ
P organique « lié »	1 095	285	traces	20	105	1 560	615	traces	225	165
P organique « libre »	13	8	13	31	81	10	10	17	39	140

3. *Phosphore et minéraux des sols calcaires.*

Quatre sols étaient étudiés : Onjon, Saint-Paul, Chartrouse et Bouzigues. Différents lots ont été séparés par densité et électromagnétisme. Les teneurs en phosphore de ces lots témoins et enrichis, sont portées sur le tableau 6. Sur ce dernier, est également indiquée la nature des *principaux* constituants minéraux des intervalles densimétriques considérés.

En fait, pour le *sol d'Onjon*, nous n'avons pas pu obtenir de lots purs, le lot de densité 2,20-2,70 qui devrait contenir quartz et feldspaths, ne contient en fait que 26 p. 100 de quartz et 74 p. 100 de calcite. Pour ce même sol, le lot de calcite (2,70-2,89) est assez pur avec 93 p. 100 de calcite.

Pour le sol de Saint-Paul, nous avons réalisé une meilleure séparation, puisque le lot de densité 2,20-2,70 contient 75 p. 100 de quartz avec des traces d'oligoclase et 25 p. 100 de calcite et le lot 2,70-2,89 se compose de 75 p. 100 de calcite avec 25 p. 100 de quartz. Le lot d'oxydes de densité > 3,33 a été séparé à partir de la fraction granulométrique > 0,2 mm plus riche en oxydes que la fraction 0,050-0,2 mm.

Le sol de Chartrouse, nous a permis d'obtenir les lots les plus purs. Aussi, pour ce sol préciserons-nous l'importance des lots, exprimée en p. 100 de la fraction sableuse étudiée (0,050-0,2 mm). Le lot 2,20-2,62 est constitué de feldspaths potassiques (microcline), avec des traces de plagioclase et de quartz et seulement 0,5 p. 100 de calcite. Ce lot représente 8,3 p. 100 du sable. Le lot 2,62-2,70 composé de quartz et d'oligoclase contient 1,7 p. 100 de calcite appréciée par attaque acide. Avec 53 p. 100,

ce lot est le constituant majeur du sable. Le lot 2,70-2,89 se compose effectivement de 96 p. 100 de calcite, avec des traces de quartz et de feldspaths calco-sodiques ; il représente 27,5 p. 100 du sable. Le lot 2,89-3,33 formé de biotite chloritisée, constitue 2,6 p. 100 du sable. Enfin, le lot magnétique de densité > 3,33 apparaît hétérogène ; formé de magnétite, hématite, ilménite, il ne représente que 1,2 p. 100 du sable.

Pour le sol de Bouzigues, le lot de densité 2,70-2,89 est formé de 85 p. 100 de calcite avec des traces d'apatite qui expliquent sa forte teneur en phosphore. Le lot 2,89-3,33 contient surtout de l'apatite identifiée par les équidistances calculées à partir du diagramme de Debye et Scherrer : 3,40-2,80-2,76-2,72-1,91-1,82. Sur la photo 1, (cf. pl. I), on reconnaît des débris dentaires provenant de ce sol.

TABLEAU 6

P_2O_5 lié aux différents minéraux de la fraction-sables 0,050-0,200 mm (sauf * > 0,2)
(en p.p.m. de P_2O_5)
ΔP = Teneur en phosphore du lot enrichi — teneur en phosphore du lot témoin

Sols	Fractions						
	Densité	2,2-2,62	2,62-2,70	2,70-2,89	2,89-3,33	2,89-3,33	> 3,33
	Nature des lots	Feldspaths	Quartz	Calcite	Biotite Chlorite	Apatite	Oxydes magnétiques
Onjon T		1 280		1 506			
Onjon Pe		1 400		1 679			
ΔP		120		173			
Saint-Paul T		362		1 090			
Saint-Paul Pe		613		2 200			6 100*
ΔP		251		1 110			
Chartrouse T		160	210	1 880	7 600		1 600
Chartrouse Pe		1 180	1 370	8 500	8 900		4 285
ΔP		1 020	1 160	6 620	1 300		2 685
Bouzigues				19 200		10% P_2O_5	

Sur le tableau 6, on note, comme on pouvait s'y attendre, que les lots provenant des sols ayant reçu des apports de superphosphate sont toujours plus riches en phosphore que les lots témoins. Avec 7 600 p.p.m. de P_2O_5, le lot témoin biotite-chlorite de Chartrouse apparaît très riche en phosphore, son observation au microscope (cf. pl. I, photo 2), permet de déceler des inclusions d'apatite dans la biotite.

Les quantités *apparentes* de phosphore lié aux minéraux et provenant de l'en-

grais, peuvent être appréciées par différence (Δ P) entre les échantillons enrichis et témoins (tabl. 6). Elles se classent dans l'ordre :

Calcite > Fraction magnétique > Biotite > Quartz + Feldspaths calco-sodiques $\geqslant$ Feldspaths potassiques

Rôle des feldspaths, du quartz et de la biotite.

Les quantités de phosphore provenant de l'engrais, liées aux lots de feldspaths potassiques et de quartz, sont du même ordre de grandeur. Le lot de quartz de Char-

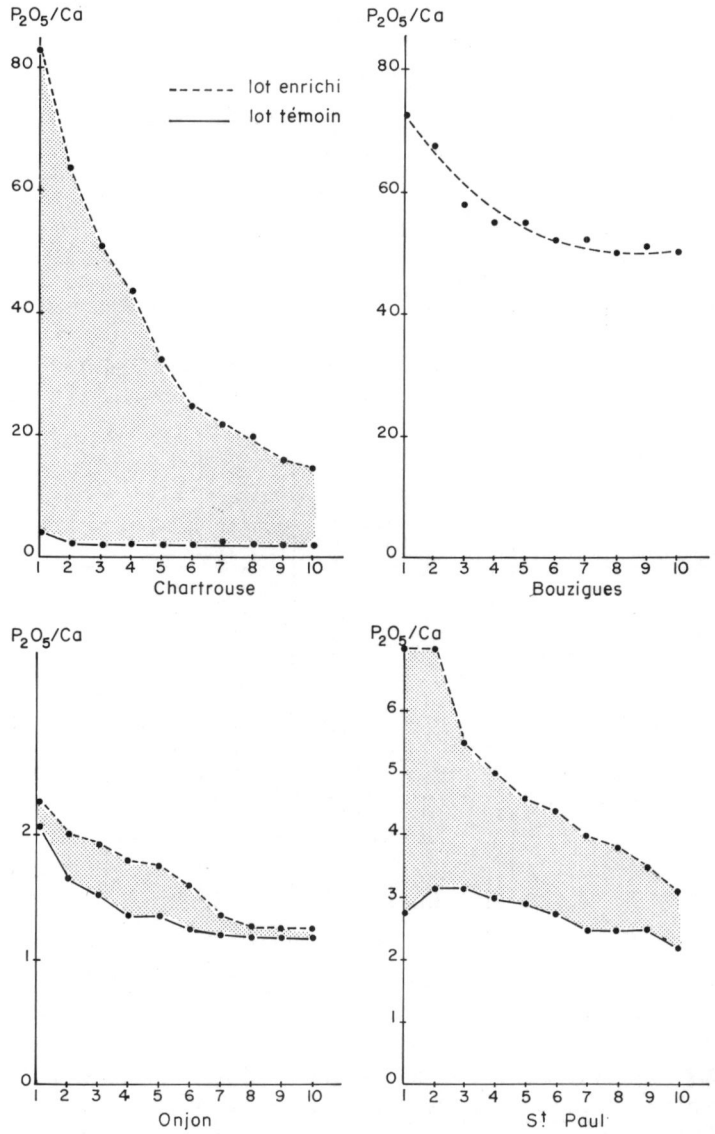


FIG. 3. — *Évolution du rapport P_2O_5/Ca au cours de 10 extractions successives par HCl 0,1 N*

trouse, malgré la présence de feldspaths calco-sodiques (oligoclase), n'a pas retenu plus de phosphore que le lot de feldspaths potassiques.

Nous avons soumis les échantillons de feldspaths potassiques et de quartz-feldspaths calco-sodiques à une attaque acide forte : HCl 6 N. Ce traitement, sans détruire les minéraux, dissout la totalité du phosphore lié provenant de l'engrais. La biotite (mica contenant du fer), n'a retenu que 1 300 p.p.m. d'acide phosphorique.

Rôle de la calcite.

Afin d'étudier la localisation du phosphore provenant de l'engrais dans la masse des granules de calcite, on a soumis 1 g de calcite 50-200 μ, témoin et enrichi, à des attaques *successives* par HCl 0,1 N. L'évolution du rapport P_2O_5/Ca qui exprime les quantités d'acide phosphorique libéré par unité de carbonate dissous est représentée, pour les quatre sols, sur la figure 3.

On constate que les sols témoins et enrichis se comportent de façon différente. Pour les échantillons témoins, le rapport P_2O_5/Ca est faible, il reste constant au cours de l'attaque. Pour le lot calcite de Bouzigues, il est plus élevé.

La différence de valeur du rapport P_2O_5/Ca entre les lots témoins et enrichis (partie hachurée sur la fig. 3), représente l'acide phosphorique provenant de l'engrais.

Sur les diagrammes de la figure 3, on remarque qu'après les dix traitements successifs par HCl 0,1 N, pour les sols de Chartrouse et Saint-Paul, la totalité du phosphore apporté sous forme d'engrais n'a pas été extraite par le réactif doux. C'est ce que confirment les résultats notés sur le tableau 7, où l'on constate que malgré l'attaque HCl 0,1 N qui a dissous la partie superficielle des grains de calcite, les lots provenant des sols enrichis présentent une teneur plus élevée en acide phosphorique que les lots témoins.

Nous avons calculé un ΔP_r résiduel qui représente, suivant les sols, 18 à 42 p. 100 du phosphore lié à la calcite avant l'attaque acide (ΔP).

TABLEAU 7

Teneurs en phosphore des résidus de l'attaque HCl 0,1 N
(en p.p.m. de P_2O_5)

Sols	Chartrouse	Onjon	Saint-Paul	Bouzigues
Témoin	640	1 059	406	18 658
Enrichi	1 840	1 133	833	—
ΔP_r	1 200	74	427	
$\frac{\Delta P_r \times 100}{\Delta P}$	18	42	38	

Rôle des oxydes magnétiques.

Les oxydes magnétiques constituent une fraction peu importante des sols (1,2 p. 100 du sable de Chartrouse et de Saint-Paul). Pour le sol de Chartrouse, la

quantité de phosphore lié au lot magnétique est plus faible que celle liée au lot de Saint-Paul.

C'est essentiellement sous forme minérale que le phosphore est lié aux oxydes de Saint-Paul. Sur le tableau 8, nous reportons la composition en phosphore des oxydes séparés à partir des différents horizons du sol de Saint-Paul enrichi (fraction granulométrique > 200 μ). Les oxydes de surface présentent les plus fortes teneurs en acide phosphorique, par suite des apports de superphosphate incorporé pour ce sol de rizière entre 0 et 12 cm.

TABLEAU 8

Phosphore dans les oxydes magnétiques de Saint-Paul Pe
(en p.p.m. de P_2O_5)

Profondeur	0-12 cm	12-20 cm	20-40 cm
P minéral	5 500	4 837	2 800
P organique	600	184	113

IV. — DISCUSSION

1. *Phosphore et fractions granulométriques*

Afin de ne pas modifier le milieu étudié, nous avons été amenés à choisir une méthode de fractionnement granulométrique imparfaite. De ce fait, on pouvait craindre une surestimation des teneurs en acide phosphorique des fractions grossières par suite d'une dispersion incomplète des pseudo-sables. Pour les sols de Saint-Paul et de Chartrouse, l'observation au microscope n'a pas permis de déceler la présence de pseudo-sables dans la fraction 0,05-0,2 mm ce qui semble indiquer, tout au moins pour ces deux sols, que la dispersion a été satisfaisante. Par suite de la dissolution du phosphore par la solution dispersante (tabl. 2), une légère redistribution du phosphore organique et minéral, sur les diverses fractions, ne peut être exclue.

L'erreur introduite par le fractionnement (tabl. 3) est de faible amplitude, et ne modifie pas l'interprétation des résultats.

L'examen des teneurs en phosphore total des échantillons témoins et enrichis (tabl. 3) permet de constater que les sols d'Onjon, Saint-Paul, Civray, et Saint-Martin-de-Hinx, ont reçu respectivement des apports de 798, 1 368, 279 et 359 p.p.m. de P_2O_5. En l'absence de données précises concernant les exportations de phosphore par les cultures, nous n'avons pas pu comparer les données analytiques aux apports effectués.

La séparation granulométrique permet d'étudier la répartition de l'engrais phosphaté dans les fractions de taille différente. Lors de l'établissement des isothermes de rétention du phosphore, nous avions constaté que ceux-ci dépendaient de la teneur en argile < 2 μ des sols (CONESA, 1967). La séparation des différentes fractions granulométriques confirme l'action de l'argile. Elle montre que, pour tous les sols, c'est la fraction la plus fine qui retient les plus fortes quantités de phosphore, ce qui est conforme à la nature des phénomènes de surface (fig. 1 et 2). L'argile < 2 μ a retenu 78 p. 100

de l'enrichissement global apparent du sol acide de Saint-Martin-de-Hinx. Le rôle de l'argile paraît relativement moins important en sol calcaire, la fraction inférieure à 2 μ a fixé 70 p. 100 et 55 p. 100 du phosphore incorporé au sol d'Onjon et de Saint-Paul.

WIECKMANN (1966) a constaté que les quantités de phosphore des différentes fractions augmentent avec la finesse des particules en sol acide. Nos résultats confirment cette observation pour le sol acide de référence. En sol calcaire, où limons et sables jouent un rôle plus important qu'en sol acide, les profils sont différents (fig. 1 et 2). C'est ainsi que les sols calcaires d'Onjon et de Saint-Paul présentent une fraction sable moyen (50-200 μ) et sable grossier (> 200 μ) plus riche en P_2O_5 que la fraction sable fin (20-50 μ). Pour ces deux sols, la fraction grossière possède un taux plus élevé en CO_3Ca que la fraction sable fin. Il semble donc que, dans ce cas, la composition minérale des fractions granulométriques ait masqué l'effet des phénomènes de surface. Le sol de Bouzigues présente le cas limite ; ici l'allure du profil s'explique par la teneur en apatite d'origine animale (SIGE, 1966) des différentes fractions granulométriques.

La rétention globale de l'acide phosphorique par la fraction fine du sol (< 2 μ) est la résultante de l'action des différents constituants de cette fraction : calcite, oxydes de fer et d'aluminium, argile, matières organiques. Nous avons pu évaluer l'importance du phosphore organique, mais il ne nous a pas été possible d'analyser le rôle des différents constituants de la fraction granulométrique fine. Les résultats obtenus pour les sables permettent de penser que la calcite et les oxydes de fer jouent un rôle important dans la rétention du phosphore par la fraction < 2 μ.

2. *Phosphore et matières organiques*

N'ayant pas détruit les matières organiques lors de la séparation granulométrique, nous avons pu étudier la distribution du phosphore organique. Ce dernier représente une part importante du phosphore total. Exprimées en pourcentage de celui-ci, les réserves de phosphore organique varient de 1,8 à 77 p. 100 (tabl. 4). Le fort pourcentage du sol d'Onjon T s'explique par le taux élevé en matières organiques du sol. De même, les teneurs en phosphore organique de Saint-Paul T (sous-sol) et de Saint-Paul Pe (horizon de surface), doivent être rapprochées des réserves de matières organiques de ces horizons (tabl. 1).

L'apport de superphosphate n'a que très peu modifié le pourcentage de phosphore organique, comme le montre la comparaison de sols témoins et enrichis. Ainsi, malgré une longue période de contact avec les sols, la majeure partie de l'engrais phosphaté demeure sous forme minérale. Le niveau du phosphore organique des sols apparaît assez stable, et, de la même façon que les réserves humiques, il ne peut être modifié que très lentement.

La fraction « phosphore organique libre » qui provient des débris racinaires ou de parties aériennes des végétaux enfouis récemment, ne représente pour les sols étudiés qu'une faible part du phosphore organique total. Notons que ce phosphore organique est susceptible de varier avec le degré de décomposition des débris végétaux, c'est-à-dire avec la période de prélèvement des échantillons.

Afin d'expliquer la présence de phosphore organique dans la fraction sableuse de Saint-Paul, on peut concevoir un enrobage des granules par les substances humiques. L'accroissement de la teneur en phosphore organique des sables de Saint-Paul T

(tabl. 5), avec la taille des particules, est en contradiction avec cette hypothèse. Il est possible qu'en cours de calcination, une partie du phosphore minéral bloqué dans les microfissures des grains de calcite, ait été libéré provoquant ainsi une surestimation du phosphore organique. De même, il est possible que la calcination ait modifié la solubilité des phosphates minéraux provoquant aussi une surestimation du phosphore organique évalué par différence.

En l'absence d'une méthode sûre pouvant servir de référence pour la détermination du phosphore organique, on notera que nos résultats sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus par KAILA (1956) et ERABI (1966).

3. *Phosphore et minéraux des sables*

a) *Rôle des feldspaths, du quartz et de la biotite.*

Une partie du phosphore incorporé au sol se retrouve sur les lots de feldspaths et de quartz. Ce phosphore est localisé à la surface des granules ; en effet, une attaque par HCl 6 N libère la totalité du phosphore provenant de l'engrais. Les études en milieu pur ont montré que le quartz n'avait aucune capacité d'adsorption pour le phosphore (PERKINS, 1946). Il semble donc que le phosphore lié à ces minéraux provienne de la précipitation du phosphore, précipitation régie par les produits de solubilité des phosphates, le quartz jouant le rôle de support inerte.

Les inclusions d'apatite identifiées dans la biotite expliquent la richesse en phosphore du lot de biotite témoin. Ces apatites sont probablement des minéraux primaires du même type que celles décrites par CAPDEVILLA (1967).

Les résultats obtenus montrent que le lot de biotite chloritisée ne retient pas plus de phosphore provenant de l'engrais, que les lots de feldspaths et de quartz. Ces données peuvent s'expliquer par la taille des hydromicas et le pH du milieu ; on sait en effet que pour les phyllo-silicates, l'adsorption des phosphates qui est maximum à pH 5, diminue avec l'accroissement du pH (MULJADI, POSNER et QUIRK, 1966).

b) *Rôle de la calcite.*

L'examen des lots de calcite provenant des sols *non enrichis* montre que ces minéraux carbonatés sont plus riches en acide phosphorique que les lots de quartz ou de feldspaths, c'est pourquoi les teneurs en phosphore des fractions granulométriques grossières sont plus fortes en sol calcaire T, qu'en sol acide T (fig. 1 et 2).

La quantité de phosphore (Δ P) provenant de l'engrais liée au lot de calcite est approximativement cinq fois plus importante que celle retenue par la fraction quartz-feldspaths (sols de Chartrouse et de Saint-Paul). Une telle différence pouvant s'expliquer par une proportion de calcite plus élevée dans la fraction la plus fine, de surface maximum, de l'intervalle granulométrique 50-200 μ, nous avons étudié, par attaque acide, la répartition des carbonates dans cet intervalle.

Si l'on considère le sable 50-200 μ de Chartrouse, on constate une distribution homogène de la calcite :

Granulométrie	0,050-0,080	0,080-0,160	0,160-0,200
P. 100 de CO_3Ca	26,7	27,2	27,0

Il y a donc une action privilégiée du carbonate de calcium.

L'attaque progressive des grains de calcite par HCl 0,1 N permet d'étudier la localisation de l'acide phosphorique dans la masse du granule :

— l'évolution du rapport P_2O_5/Ca indique que le phosphore est uniformément réparti dans la masse des granules de calcite. Le rapport élevé du lot de calcite témoin de Bouzigues s'explique par la présence de grains d'apatite mélangés à la calcite.

— Pour les lots enrichis, le rapport P_2O_5/Ca diminue rapidement, ce qui montre que la majeure partie du phosphore de l'engrais se trouve dans la région superficielle des grains de calcite. Cependant, ce phosphore n'est libéré que progressivement au cours des traitements successifs (fig. 3), ce qui donne à penser que l'acide phosphorique se présente sous forme de phosphates peu solubles. L'observation au microscope des lots de calcite ne permet pas de déceler la présence de cristallites de phosphates néoformés à partir du superphosphate. Par agitation vigoureuse, à sec, des sables de calcite, nous avons provoqué une usure des grains par frottement. La poudre recueillie, qui provient de la surface de ces grains, a été examinée par diffraction aux rayons X. Les diagrammes ne révèlent pas la présence de phosphates cristallins, soit que ceux-ci se trouvent en quantité inférieure au seuil de détection de l'appareil, soit que le phosphate se trouve à l'état amorphe.

On peut également envisager une refixation du phosphore sur la calcite, après neutralisation de l'acide, en cours de percolation :

— l'analyse des résidus d'attaque acide montre que le traitement acide n'a pas dissous la totalité du phosphore de l'engrais. Il y a pourtant eu une dissolution importante de la partie superficielle des grains de calcite, comme le montre la photo 3 (cf. pl. II). On peut donc se demander si le phosphore n'a pas pénétré dans les granules de calcite. L'examen des sables de calcite, au microscope, permet en effet de déceler des microfissures à l'intérieur des grains extraits du sol de Chartrouse (cf. pl. II, photo 4). Pour le sol de Saint-Paul, on constate la présence de nombreux débris coquillés de structure lamellaire. Il est donc possible que le phosphore pénètre dans la partie centrale des grains. Sous forme de remplissage fissural, le phosphore peut alors être protégé de l'attaque acide superficielle . Goni (1966) a montré, pour d'autres éléments que le phosphore, le rôle que pouvaient jouer les microfissures de la calcite et de l'aragonite dans la localisation des éléments en traces.

c) *Rôle des oxydes magnétiques.*

Le lot magnétique de Chartrouse possède une quantité de phosphore lié plus faible que le lot magnétique de Saint-Paul. Les études en laboratoire, de Gastuche *et al.* (1963) ont montré qu'à pH 4,6 c'est surtout à l'état amorphe, que les oxydes de fer fixent le phosphore. L'examen par diffraction des rayons X des lots magnétiques de Chartrouse montre qu'il s'agit de minéraux bien cristallisés. Par contre, le diagramme de poudre obtenu pour les concrétions magnétiques du sol de Saint-Paul enrichi montre des raies larges (équidistances de la maghémite : 2,90 — 2,83 — 2,49 — 2,07 — 1,61 — 1,47) et un fort halo de diffusion aux faibles angles qui donne à penser qu'il s'agit d'oxydes mal cristallisés. Il semble donc que la présence d'oxydes amorphes explique la forte quantité de phosphore retenue par les concrétions magnétiques de Saint-Paul. Malgré le pH du milieu, les oxydes retiennent de fortes quantités de phosphore. Nous avons vu que c'était essentiellement sous forme minérale que se trouvait le phosphore de ces concrétions.

V. — CONCLUSION

Le rôle des différents facteurs du milieu a été étudié à l'aide de méthodes de fractionnement physique. Nous nous sommes trouvés confrontés aux difficultés inhérentes à ce type de recherche : la technique de séparation, préalable à la mesure, perturbe le milieu étudié. Il ne semble pas cependant que les erreurs introduites modifient l'interprétation des résultats.

L'étude de la répartition du phosphore dans les différentes fractions granulométriques, a montré qu'une grande partie du phosphore incorporé au sol sous forme d'engrais solubles se trouve dans la fraction argileuse. Le profil des diagrammes de phosphore lié à la granulométrie, caractérise ainsi l'histoire culturale d'un sol : les sols de Saint-Paul et de Chartrouse qui n'ont pas reçu de superphosphate présentent un profil « écrasé », très différent de celui des mêmes sols enrichis. Le sol de Bouzigues, naturellement riche en apatite, où les fractions les plus grossières présentent les plus fortes teneurs en phosphore total, constitue le cas limite. Nos observations complètent celles d'ERABI (1966), qui a montré que le phosphore pouvait être un bon marqueur de l'histoire culturale des sols.

Le phosphore organique peut représenter jusqu'à 77 p. 100 du phosphore total pour les sols étudiés, il se trouve essentiellement sous forme évoluée, liée aux fractions minérales les plus fines. L'importance des réserves de phosphore organique montre les limites des études de la dynamique du phosphore qui ne considèrent que l'aspect minéral du problème et négligent le phosphore combiné aux molécules organiques.

En sol calcaire, les sables jouent un rôle non négligeable dans la fixation de l'acide phosphorique. L'étude des différents minéraux des sables montre que la calcite et les oxydes magnétiques possèdent les plus fortes teneurs en acide phosphorique, tandis que la biotite, les feldspaths et le quartz, ont une action moins importante.

Le phosphore incorporé au sol se trouve, en grande partie, à la surface des particules. Les résultats de l'attaque acide et l'étude au microscope des granules de calcite permettent d'envisager deux types de rétrogradation de l'acide phosphorique :

1. formation de phosphates peu solubles,

2. pénétration du phosphore dans les microfissures des grains où, sous forme de remplissage, il serait protégé de l'attaque acide superficielle.

En définitive, nos résultats sont en accord avec ceux obtenus à partir de modèles simplifiés et les deux méthodes d'approche apparaissent complémentaires.

Reçu pour publication en avril 1969.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la Société Péchiney-Saint-Gobain, qui a bien voulu nous fournir les échantillons de sols provenant de ses dispositifs expérimentaux d'Onjon, Civray et Saint-Martin-de-Hinx.

SUMMARY

THE VARIOUS ASPECTS OF PHOSPHORUS DISTRIBUTION IN LIMESTONE SOILS

The quantities of phosphorus bound to the particle-size, organic and mineral fractions, have been evaluated. We have checked the important part played by the fine fractions ($< 2\ \mu$) of the soil in phosphorus retention. One part of this phosphorus, which is bound to the clays, is present in highly developed organic form. In global terms the organic phosphorus may represent 77 p. 100 of the total phosphorus content of the soil.

In contrast to what occurs in acid soils, limestone sands play a not insignificant part in the fixation of phosphorus which is bound predominantly to magnetic oxides and calcite, acting in forms sparingly soluble by a mild acid. The feldspars, quartz and biotite, have very low bound phosphorus contents. The selected method of fractionation appears, therefore, to be complementary to the methods for the dynamic study of phosphorus, based on simplified models.

ZUSAMMENFASSUNG

EINIGE ASPEKTE DER VERTEILUNG DES PHOSPHORS IM KALKBODEN

Die mit den organischen und mineralischen granulometrischen Fraktionen gebundenen Phosphormengen wurden ermittelt. Die wichtige Rolle der feinen ($< 2\ \mu$) Boden-körnchen für das Zurückhalten des Phosphors wurde kontrolliert. Ein Teil dieses mit Tonteilchen gebundenen Phosphors befindet sich in entwickelter organischer Form. Im Ganzen, kann der organische Phosphor bis zu 77 p. 100 des gesamten Phosphors des Bodens darstellen.

Im Gegensatz zu saueren Böden spielen die Kalksande eine nicht zu unterschätzende Rolle in der Fixierung des Phosphors, der in schwer durch eine leichte Säure lösbaren Formen, besonders mit magnetischen Oxyden und mit dem Kalzit gebunden ist. Die Feldspate, der Quarz und Biotit weisen einen schwächeren Gehalt an gebundenem Phosphor auf. So erscheint die gewählte Fraktionierungsmethode als ein komplementärverfahren zu den Untersuchungsmethoden über die Dynamik des Phosphors, die sich auf vereinfachte Modelle stützen.

Некоторые аспекты распределения фосфора в известковых почвах.

А. П. КОНЭЗА.

РЕЗЮМЕ

Автор определил количества фосфора связанного с гранулометрическими органическими и минеральными фракциями и проверил важность роли самых мелких почвенных частичек ($< 2\ \mu$) в удерживании этого элемента. Часть этого фосфора, связанного с глинами, находится в органической форме закончившей свою эволюцию и общее количество органического фосфора нередко представляет до 77 % суммарного фосфора почвы.

В отличие от того, что происходит обычно в кислых почвах, известковые пески играют немаловажную роль в фиксации фосфора, который связывается особенно с магнитными окисями и с кальцитом в формах слаборастворимых в слабых кислотах.

Фельдсфаты, кварц и биотит содержат наименее связанного фосфора.

Таким образом выбранная методика фракционирования дополняет методы изучения динамики фосфора на упрощенных моделях.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARVIEU J. C., 1967. *Évolution des phosphates solubles en présence de CO_3Ca. Formation de phosphates calciques apatitiques.* D.E.S. Fac. Sciences, Nice.

BARBIER G., CHABANNES J., 1949. Sur les mécanismes de l'adsorption des phosphates par divers constituants des argiles des sols. *Ann. agron.*, **19**, 343-374.

BLANCHET R., 1960. Adsorption et dilution isotopique des ions phosphoriques au contact des hydroxydes métalliques et des argiles. *Ann. agron.*, **10**, 55-74.

BOISCHOT P., COPPENET M., HÉBERT J., 1949. Fixation de l'ion phosphorique sur les sables calcaires des sols. *Ann. agron.*, **19**, 103-112.

CAPDEVILLA R., 1967. Répartition et habitus de l'apatite dans les granites de Neira (Espagne). Comparaison avec les données expérimentales et applications pétrologiques. *C. R. Acad. Sci.*, **264**, 1694-1697.

CONESA A. P., 1967. Emploi d'une résine anionique pour l'étude du *potentiel phosphate* des sols. *Colloque international des phosphates minéraux solides.* Toulouse, **2**, 125-129.

DUVAL L., 1964. Le dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique conditions de validité, application à la détermination du phosphore total des sols. *Sci. Sol*, 1er semestre, nº 2.

ERABI C. H., 1966. *Étude de la variation de la teneur en éléments fertilisants dans les sols.* Thèse. Faculté des Sciences, Paris.

GASTUCHE M. C., FRIPIAT J. J., SOKOLSKI, 1963. Fixation du PO_4 par les hydroxydes de fer et d'aluminium amorphes et cristallisés. *Pédologie*, **13**, 155-180.

GÈZE G., 1940. Sur les phosphorites du Bas-Languedoc. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **10**, 87-94.

GOLDSZTAUB S., HÉNIN S., WEY R., 1954. Sur l'adsorption d'ions phosphoriques par les argiles. *Clay. Min. Bull.*, **2**, 162.

GONI J., 1966. Contribution à l'étude de la localisation et de la distribution des éléments en traces dans les minéraux. *Mémoires du B. R. G.* M., nº 45.

KAILA et *al.*, 1956. Accumulation of fertilizer phosphorus in peat soils. *J. Sci. Agric. Soc.*, Finland. **28**, 168-178.

MONNIER G., TURC L., Colette JEANSON-LUVSINANG, 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

MULJADI D., POSNER M., QUIRK J. P., 1966. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboemite. Part. I. The isotherms and the effect of pH on adsorption. *J. Soil Sci.*, **17**, 212.

PERKINS A. T., 1946. Phosphate fixation by soil minerals. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **10**, 102-106.

RADET F., 1962. Contribution à l'étude du comportement des engrais phosphatés dans les sols de craie. *Bull. A. F. E. S.*, 287-305.

SCHOEN U., BARBIER G., HÉNIN S., 1954. Sur l'évolution des phosphates calciques dans les conditions du sol. *Ann. agron.*, **4**, 441-457.

SIGE B., 1966. *Les chiroptères fossiles de Bouzigues* (Hérault). Thèse 3e cycle, Paris.

WIECKMANN, 1966. Distribution du phosphore dans les fractions granulométriques des sols après une fertilisation avec du superphosphate et des scories. *Z. Pflanzenernähr.* **115**, 123-133.

PLANCHE I

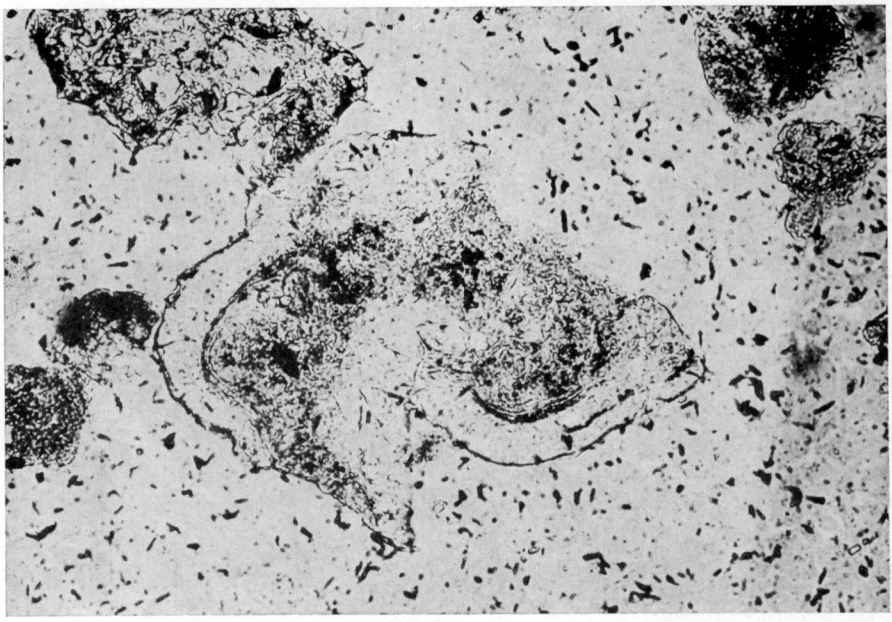


PHOTO 1. — *Apatite de Bouzigues. — Débris dentaires*
Grandissement linéaire 200

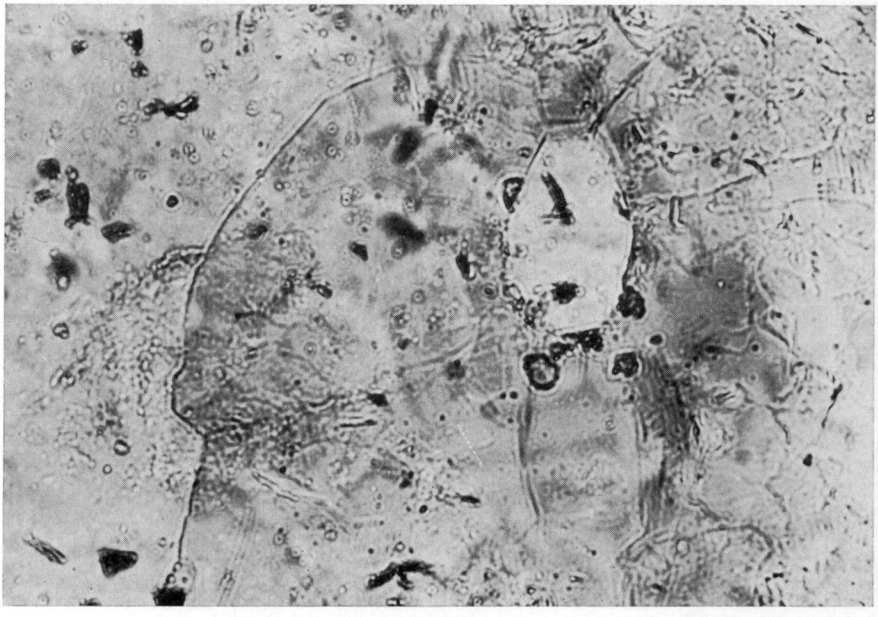


PHOTO 2. — *Inclusion d'apatite dans la biotite,*
Sol de Chartrouse
Grandissement linéaire 650

PLANCHE II

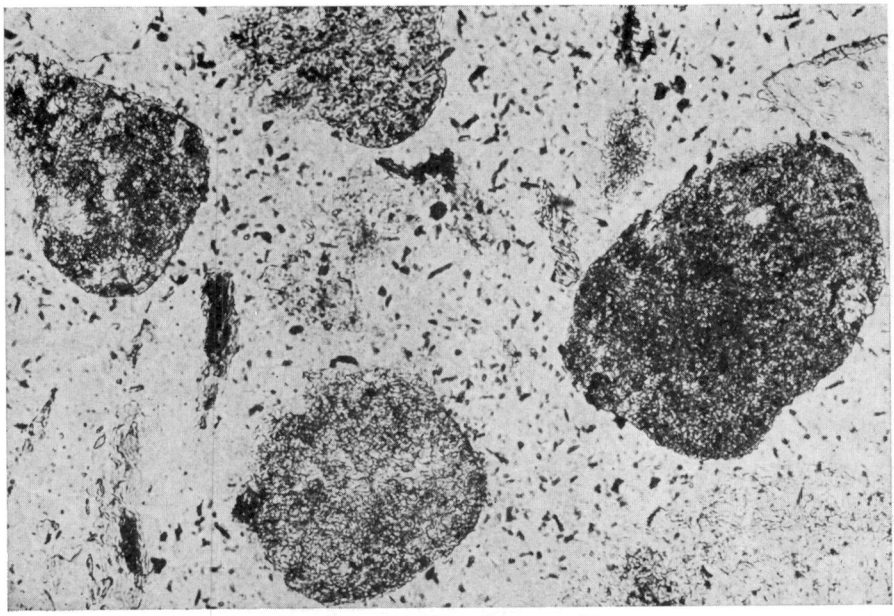


PHOTO 3. — *Résidus d'attaque acide.*
Calcite du sol de Chartrouse
Grandissement linéaire : 75

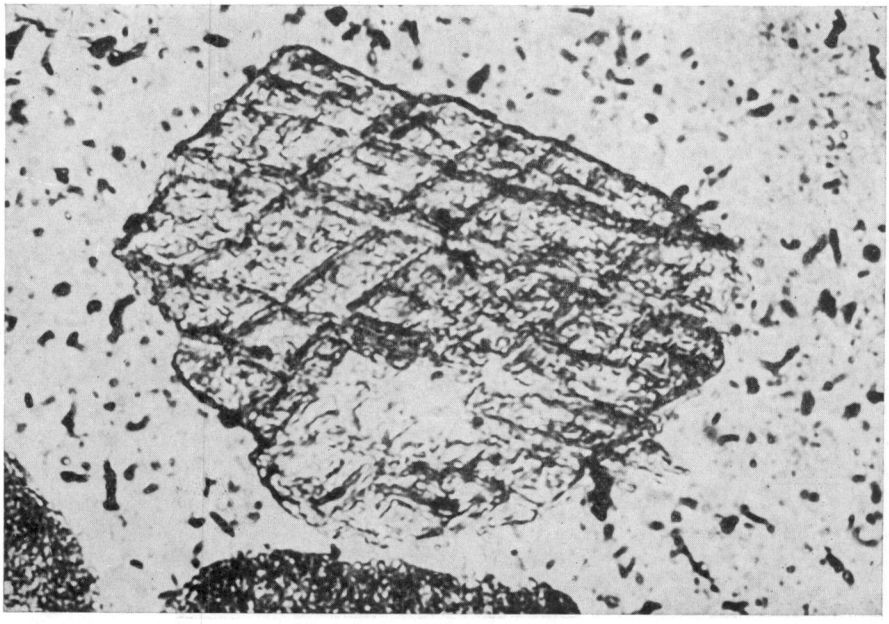


PHOTO 4. — *Granule de calcite avant attaque par HCl 0,1 N.*
Sol de Chartrouse
Grandissement linéaire 400

Ann. agron., 1969, **20** (3), 245-261.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA CIRCULATION DE L'EAU NON SATURANTE DE DIFFÉRENTS SOLS VERS UNE ZONE D'ABSORPTION

J. PUECH
avec la collaboration technique de M. HERNANDEZ

Station d'Agronomie et d'Œnologie,
67, boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Les modalités de la circulation de l'eau non saturante, vers une zone d'absorption simulant l'effet des racines, ont été étudiées sur trois sols de texture différente (sols argileux, limoneux, sableux) considérés à divers états d'humidité, en utilisant le gel de silice comme absorbant et modèle de racine. Les divers résultats expérimentaux sont confrontés et discutés ; leur interprétation plus théorique fera l'objet d'une prochaine étude.

I. — INTRODUCTION

Les difficultés rencontrées dans la recherche des critères de la disponibilité de l'eau du sol pour un végétal, ont amené à considérer un certain nombre de paramètres, en étudiant les mécanismes et les forces intervenant dans la dessiccation des sols.

Progressivement, des travaux ont permis de tenir compte d'un « potentiel efficace », régissant la circulation de l'eau et faisant notamment intervenir la vitesse de dessèchement (HALLAIRE, HÉNIN, 1958 ; HALLAIRE, 1964).

Cette notion est importante lorsque des végétaux sont en cause ; en effet, si l'intensité de la demande climatique dépasse un certain seuil, les plantes réagissent le plus souvent par une réduction de leur activité photosynthétique, pouvant s'accompagner d'un flétrissement, généralement temporaire. Il existe par conséquent un débit critique (HALLAIRE, 1953, 1968) au niveau soit du sol (terme « d'offre » et

notamment de degré de mobilité de l'eau sur son support), soit du végétal (terme « absorbant et transporteur », avec inadaptation possible à des conditions de transpiration trop intense). Dans le système « sol-eau-plante », le végétal se trouve donc rarement en état d'équilibre avec le sol (GARDNER, 1965). Il devient alors intéressant de connaître, pour quelques types de sol, quels sont les débits réalisables et les modalités des mouvements d'eau au voisinage des racines, zone où des gradients d'humidité d'ampleur variable peuvent exister (COWAN, 1965 ; MORIZET, 1967 ; BLANCHET, 1968).

Ces processus mettent, d'ailleurs, également en jeu l'étendue de la surface absorbante des racines.

L'utilisation expérimentale directe des racines, qui extraient l'eau en phase liquide s'étant avérée difficile et délicate sur une surface déterminée et fixe, nous avons eu recours, pour aborder en première analyse les transferts d'eau dans le sol, à un modèle de racines : le gel de silice (PUECH, 1966).

Après avoir décrit les techniques expérimentales utilisées, nous étudierons sur différents sols l'évolution du débit et la façon dont est cédée l'eau par des tranches successives de terre, plus ou moins éloignées de l'absorbant, suivant les diverses conditions d'humidité du sol et d'intensité de la succion. A la lumière de ces résultats, nous tenterons ensuite de donner quelques explications des phénomènes observés et d'en dégager quelques conséquences, sans toutefois entrer dans des considérations relativement théoriques qui pourront faire l'objet d'une autre étude.

II. — TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET MATÉRIEL UTILISÉ

Les caractéristiques physiques et hydriques des sols utilisés sont données au tableau 1. Dans les essais, la terre passée au tamis de 2 mm est amenée à l'humidité voulue et laissée 24 heures en repos, à l'abri de l'évaporation. Pour les expériences, elle est introduite dans des tubes de 6,15 cm² de section et de 10 cm de longueur, permettant d'obtenir facilement, par remplissage régulier, une

TABLEAU I

Propriétés physiques et hydriques des sols utilisés

	Analyse granulométrique en %						Caractéristiques hydriques % MS	
	Argile < 2 µ	Limon fin 2-20 µ	Limon grossier 20-50 µ	Sable moyen 50-200 µ	Sable grossier 200-2000 µ	Matière organique	Capacité au champ	Humidité à pF 4,2
Sol argileux	31,7	18,8	19,0	14,7	13,1	1,00	22,5	11,1
Sol sableux	3,2	3,6	11,9	28,8	50,2	0,9	10,9	2,3
Sol limoneux	12	18,1	43,3	13,5	10,3	1,4	20,8	6,5

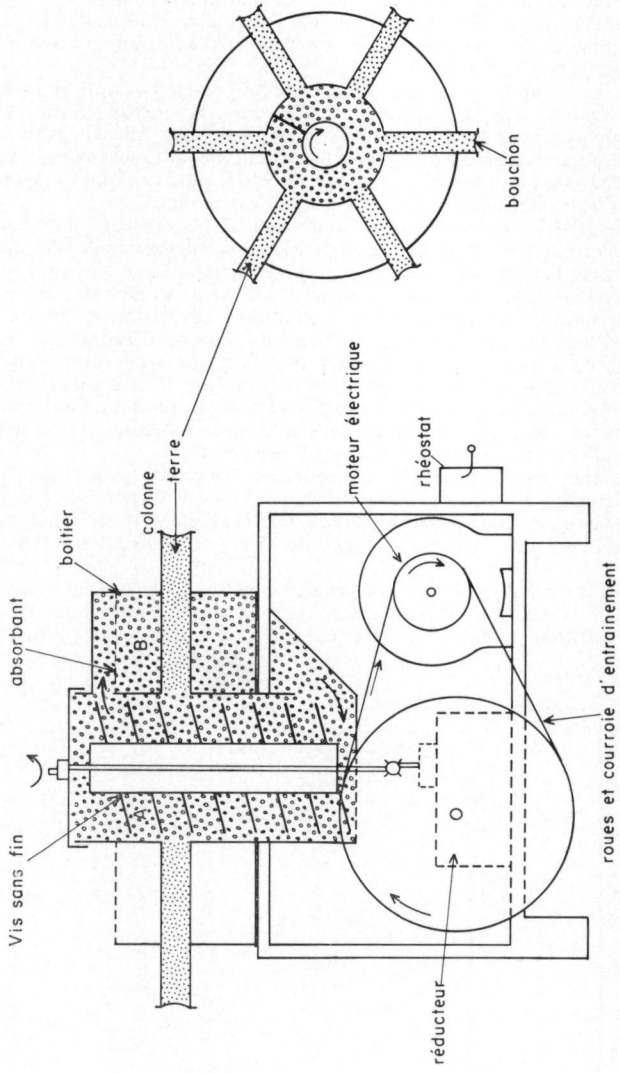


FIG. 1. — *Appareil utilisé pour obtenir le renouvellement permanent du gel de silice au contact de la terre à dessécher*

porosité constante (45 p. 100). Les tubes sont alors bouchés hermétiquement à une extrémité, tandis que l'autre est mise en contact avec le gel de silice. Après des temps de succion variables, réalisés en conditions isothermes (20°C), les colonnes de terre sont découpées en tranches, dont on détermine l'humidité (passage à l'étuve à 105°) pour établir les profils hydriques et définir les différents éléments de la dynamique de l'eau.

Le gel de silice qui peut, par l'intermédiaire de ses microcapillaires (KRUYT, 1933), extraire l'eau en phase liquide, a été retenu car il ne modifie pas le milieu, agit par contact, reste facilement régénérable par la chaleur et peut être utilisé sur une surface déterminée. Le produit utilisé est l' « Actigel Granulé » (Prolabo) avec ou sans indicateur de saturation au chlorure de cobalt.

La force de succion développée est fonction de l'humidité du produit. Elle peut donc soit décroître dans le temps, si l'absorbant n'est pas renouvelé, soit demeurer constante s'il est renouvelé en permanence, au contact de la terre à dessécher.

La vitesse d'absorption du produit (sec ou humide) reste toujours importante et du même ordre, à condition d'avoir un renouvellement suffisant. D'autre part, la quantité d'eau pouvant être extraite dans l'unité de temps est très importante dans le cas d'eau libre. Ainsi du gel mis en contact avec l'eau d'un potomètre par l'intermédiaire d'une pastille de buvard, surmontant un filtre de bronze, pour faire effet de frein, extrait encore cette eau 1 500 fois plus vite que sur les échantillons de terre les plus humides, si on considère la première heure d'extraction.

Enfin, il a été vérifié expérimentalement que l'application au gel et au sol humides, de mêmes forces, telles que les pressions exercées dans l'appareil de Richards, laissaient subsister dans les deux milieux de l'eau retenue avec la même énergie. En effet, si ces deux milieux sont ensuite amenés en contact l'un de l'autre, il ne se produit aucun mouvement d'eau, même au bout de plusieurs jours.

Pour obtenir une circulation continue du produit à l'abri de l'évaporation, nous avons réalisé un appareil travaillant de manière autonome (fig. 1). Le gel de silice est d'abord broyé en grains de 1 mm de diamètre, de façon à assurer un bon contact avec la terre. Il est ensuite introduit dans l'appareil (en A et B). Une vis sans fin, mue par un moteur électrique, à vitesse de rotation réglable par rhéostat, permet d'obtenir un entraînement régulier et lent du produit. Ce dernier est alors appliqué contre les parois, assurant ainsi le contact avec la terre au niveau où débouchent les tubes. Périodiquement, la constance de l'humidité de l'absorbant est vérifiée.

Par ailleurs, la circulation en phase liquide et l'apparition éventuelle de la phase gazeuse, sont mises en évidence par marquage de l'eau par un sel (Cl_2Ca), qui n'est transporté qu'en solution et se dépose lorsqu'intervient la vaporisation (COLLIS-GEORGE, HÉNIN, KELLY, 1963; BALLIF et *al.*, 1966). Dans ce cas, le gel utilisé n'est pas coloré. Les dosages du chlore sont effectués par mercurimétrie (CHARLOT, 1961).

Les résultats obtenus montrent qu'il peut y avoir accumulation de chlore en surface, alors que la concentration en Cl^- de la solution reste constante dans le profil. L'accumulation est surtout sensible lorsque les échantillons de terre sont initialement peu humides, et mis en contact avec du gel relativement sec (fig. 2).

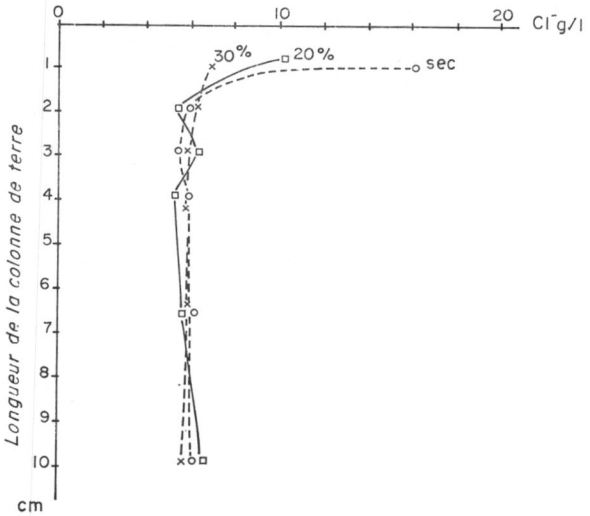


FIG. 2. — *Évolution de la teneur en chlore à différents niveaux d'un même sol pris à humidité initiale identique et soumis à une succion variable* (gel sec, à 20 p. 100 et 30 p. 100 d'eau) (sol humidifié avec Cl^2Ca 1 p. 100)

III. — RÉSULTATS

1. *Allure générale du dessèchement sur des terres prises à divers états d'humidité*

A succion constante, les quantités d'eau extraites en fonction du temps, sont d'autant plus importantes que la teneur en eau initiale de la terre utilisée est élevée. Mais pour des états d'humidité comparables (exemple : sols près de la capacité au champ), le sol limoneux débite instantanément plus que les sols sableux et argileux (fig. 3). En ce qui concerne les rythmes de fourniture, trois étapes surtout nettes

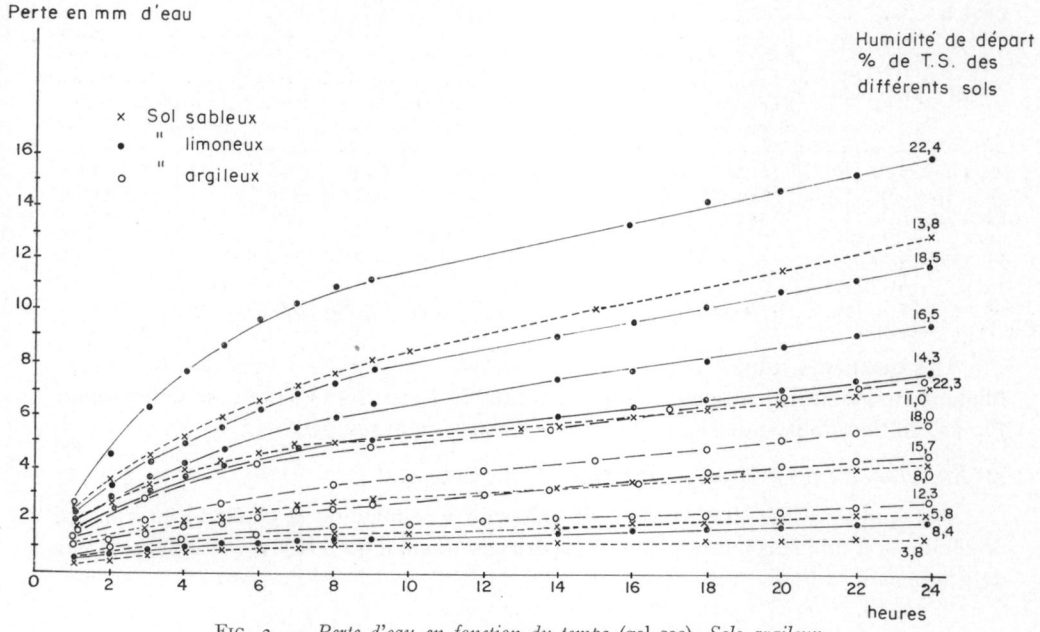


FIG. 3. — *Perte d'eau en fonction du temps* (gel sec). *Sols argileux, limoneux et sableux à différentes humidités initiales*

avec des succions fortes, peuvent être retenues. Le phénomène peut alors se rapprocher des stades décrits au cours de la dessiccation du sol par évaporation (FEODOROFF, RAFI, 1962). Dès le début de la succion, la perte d'eau est relativement importante (surtout dans le limon) mais de durée assez faible. Cette première phase semble correspondre à l'établissement rapide d'un gradient de potentiel entre le sol et l'absorbant situé à son voisinage immédiat. Cet « effet de choc » est d'autant plus sensible que l'intensité de la demande est plus forte. Ensuite, pour tous les types de sols, le rythme des pertes d'eau décroît lentement (pendant 6-7 heures) pour devenir faible et à peu près constant (tabl. 2).

Les pertes d'eau diminuant rapidement dans le temps, malgré des réserves encore importantes, il est nécessaire d'en rechercher les causes et d'étudier l'évolution des profils hydriques.

TABLEAU 2

Perte horaire du sol à différents temps (cas du sol argileux)
Eau p. 100 de terre sèche

Gel sec	Humidité initiale							
	22,3		18		15,7		12,3	
	Humidité de départ	Perte en eau	Humidité de départ	Perte en eau	Humidité de départ	Perte en eau	Humidité de départ	Perte en eau
0 - 1 h	22,3	1,30	18	0,90	15,7	0,70	12,3	0,40
6 - 7 h	19,3	0,18	16	0,15	13,7	0,10	11,3	0,10
23-24 h	17,1	0,14	14,1	0,10	12,7	0,07	10,4	0,05
Gel à 20 % eau	21,9		17,8		15,5		12,2	
	Humidité de départ	Perte en eau	Humidité de départ	Perte en eau	Humidité de départ	Perte en eau	Humidité de départ	Perte en eau
0 - 1 h	21,9	1,10	17,8	0,80	15,5	0,55	12,2	0,40
6 - 7 h	19,1	0,25	15,9	0,15	13,6	0,10	11,2	0,07
23-24 h	16,2	0,17	14	0,10	12,9	0,05	10,7	0,04

2. *Observations sur des gradients d'humidité*

Des gradients d'humidité, d'ampleur variable suivant les types de sols, s'établissent fréquemment au cours de l'extraction de l'eau. Ils évoluent en fonction du temps, de l'humidité initiale et de la force de succion appliquée.

a) *Évolution du profil hydrique au cours du dessèchement.*

Lorsque les différentes terres sont prises au voisinage de la capacité au champ, et soumises à une succion modérée, l'expérience montre qu'il n'y a pratiquement pas de gradient d'humidité au début.

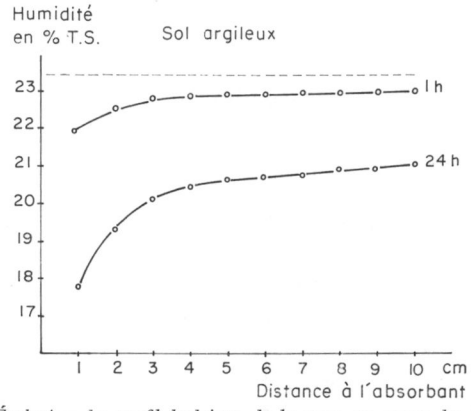


FIG. 4. — *Évolution du profil hydrique de la terre au cours du dessèchement* (gel à 25 p. 100). *Cas du sol argileux*

Puis, le dessèchement se poursuivant, le gradient apparaît progressivement et avec une ampleur plus grande dans le sol argileux que dans les deux autres sols. Le flux liquide qui se produisait dans toute la terre, finit par intéresser préférentiellement les premières couches (fig. 4).

b) *Rôle de l'humidité initiale.*

Si la succion est réalisée sur une série de colonnes contenant de la terre d'humidité décroissante, le gradient d'humidité est d'autant plus élevé que la terre est moins humide (fig. 5). Le phénomène est plus marqué sur le sol de texture argileuse que sur les deux autres étudiés. L'ampleur du gradient met donc en évidence la difficulté de la circulation de l'eau au sein de la terre lorsqu'elle se dessèche.

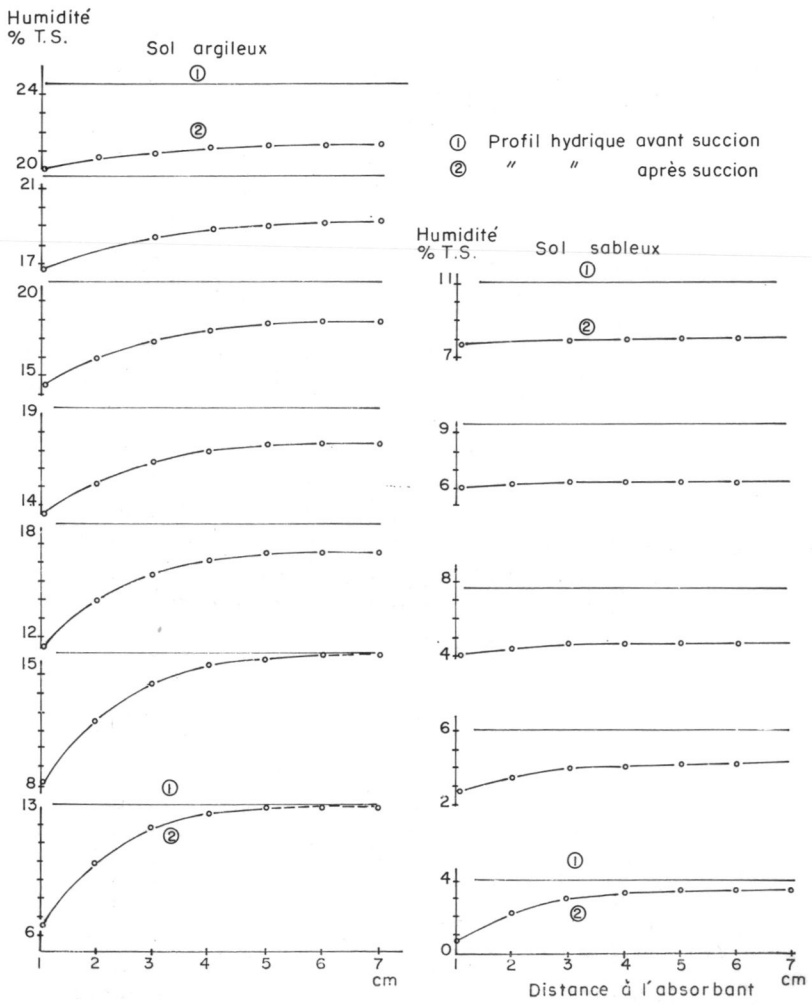
c) *Rôle de l'intensité de la succion.*

Si la force de succion est augmentée en employant un absorbant de moins en moins humide, le volume d'eau extrait par unité de temps augmente, mais la contribution des couches de terre devient inégale. Le profil hydrique présente une convexité d'autant plus accusée vers la zone d'extraction que la demande en eau est plus forte. Le phénomène est général pour les trois sols, mais d'ampleur différente selon les types texturaux (fig. 6). Pour assurer le débit, les premières tranches de terre doivent se dessécher rapidement et l'eau située au-delà de cette faible distance, participe de moins en moins bien au mouvement d'alimentation. Il apparaît ainsi une sorte d'inertie au sein de la terre, à effet très net en sol argileux, et qui freine l'établissement de débits importants.

3. *Évolution du profil hydrique d'un sol partiellement desséché, après arrêt de la succion*

Suivant les conditions expérimentales, les profils hydriques peuvent présenter par conséquent un gradient d'humidité d'ampleur variable. Il est alors intéressant de savoir dans quelle mesure, après arrêt de la succion pendant des temps plus ou moins longs, l'eau peut se mouvoir dans la terre pour en réhomogénéiser l'humidité. Pour cela, un gradient d'humidité important a été provoqué en soumettant à une succion de 7 heures des tubes contenant les différentes terres prises assez près de la capacité au champ. La succion a ensuite été arrêtée et un profil hydrique de référence a été établi sur chaque sol. Les tubes restants, après avoir été bouchés hermétiquement, ont été placés dans une enceinte à température constante. Les profils hydriques ainsi laissés sous l'influence des seules forces capillaires du sol ont été remesurés au bout de différents temps.

Après 24 heures de repos, le profil indique un léger gain d'humidité des tranches qui avaient été les plus desséchées (fig. 7). Mais, pour les durées supérieures (48, 72, 120, 162 heures) le profil reste stationnaire, malgré l'existence d'un gradient important dans les premières tranches. Pour les trois sols étudiés, la réhomogénéisation du milieu est donc très limitée, ce qui rejoint les phénomènes d'hystérésis observés par un certain nombre d'auteurs (HALLAIRE, 1953). Comme cela a déjà été signalé, le gradient de potentiel capillaire n'est donc pas le véritable (ou le seul) moteur des mouvements d'eau.



← FIG. 5. — *Évolution après 24 heures de succion du profil hydrique de la terre prise à différentes humidités* (gel sec. non renouvelé). *Cas des sols argileux et sableux*

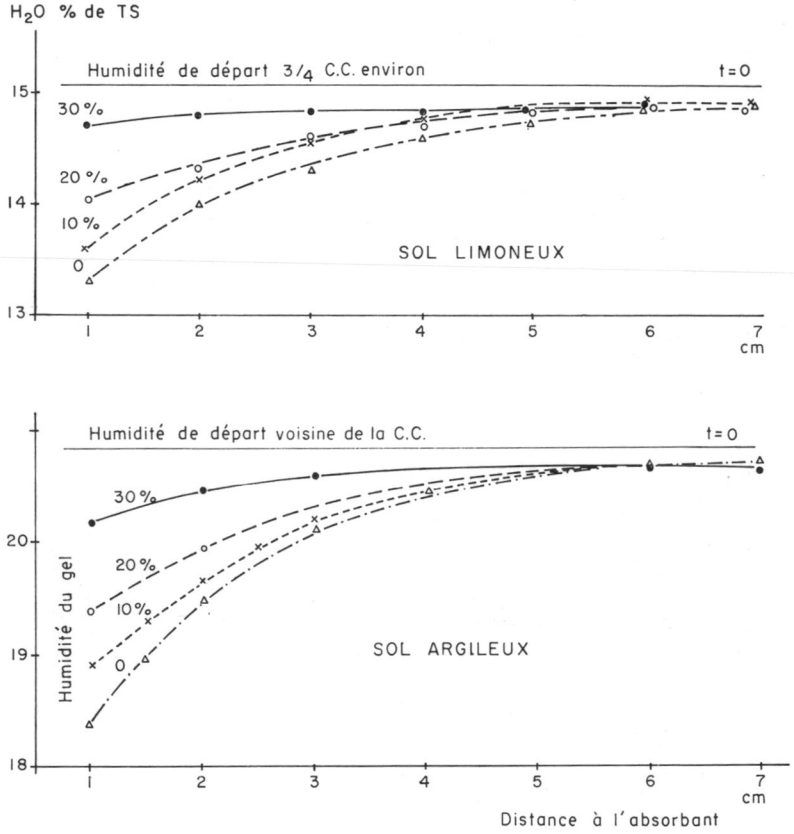


FIG. 6. — *Évolution du profil hydrique en fonction de l'intensité de la succion* (gel sec, 10, 20 et 30 p. 100). *Une heure sans renouvellement*

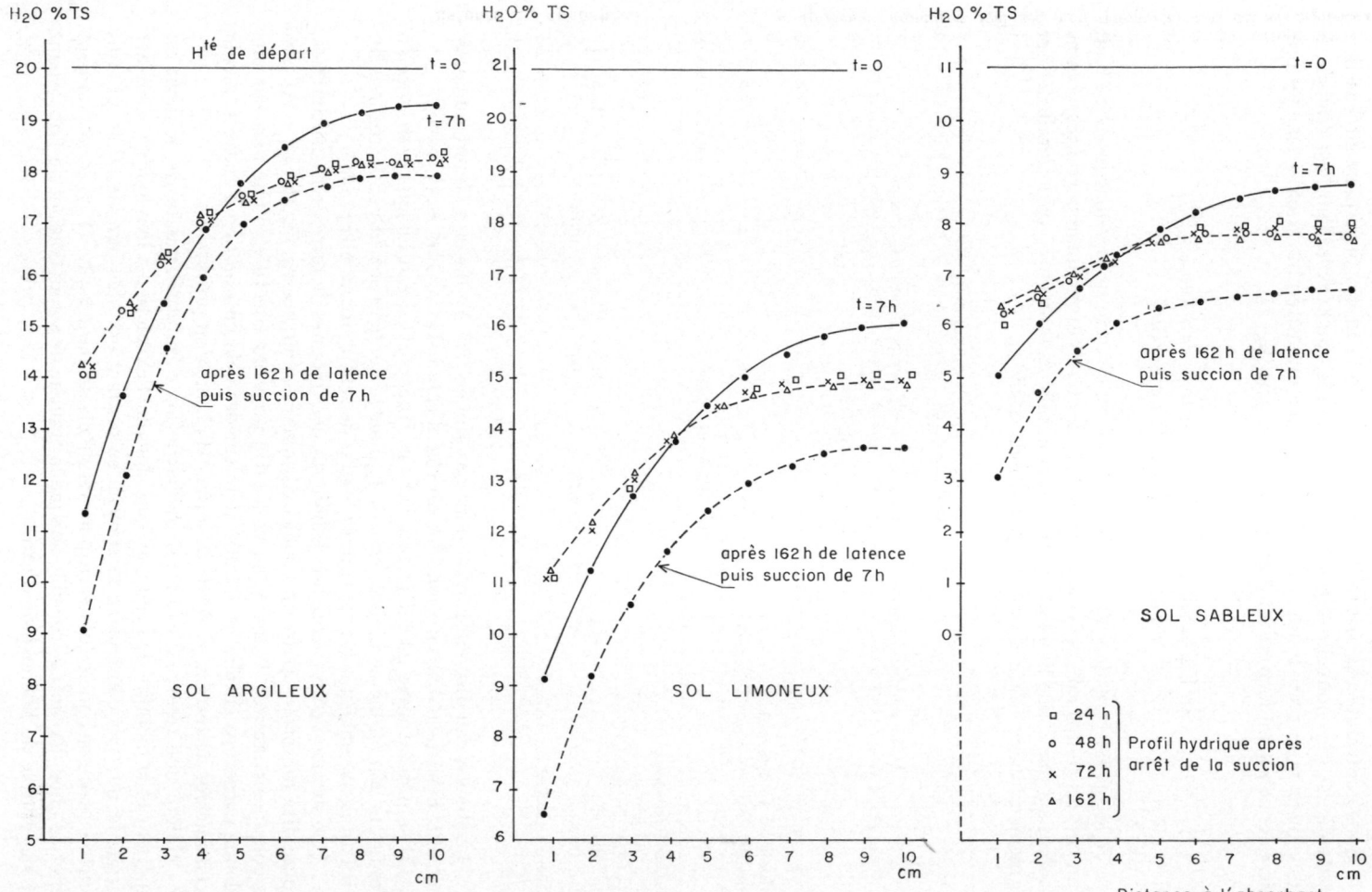


FIG. 7. — *Évolution du profil hydrique d'un sol partiellement desséché après arrêt de la succion pendant un temps variable* (24 à 162 h). *Puis après une nouvelle succion* (gel de silice sec)

Sans contrainte extérieure, le déplacement de l'eau n'a pratiquement pas lieu. Toutefois, si une nouvelle succion de même durée que la précédente est réalisée, le mouvement se fait sur toute la colonne, avec une intensité plus grande dans les premières couches, où le gradient d'humidité s'amplifie (fig. 7).

4. *Variation du débit en fonction de l'humidité de la zone voisine de l'absorbant*

Si le sol est considéré près de la capacité au champ, nous remarquons au bout d'un certain temps qu'il se comporte malgré des réserves encore importantes, comme le même sol pris à une humidité initiale uniforme mais inférieure, qu'on ferait débiter au même moment, dans les mêmes conditions (tabl. 3).

TABLEAU 3

Débit horaire comparé du même sol à différentes humidités initiales après 1 heure de succion et du sol le plus humide après la dixième heure de succion
(cas du sol argileux)

Humidité au temps 0 (p. 100 TS)	22,3	18	15,7	12,3	22,3
	Après une heure				après 10 heures
Humidité moyenne (p. 100 TS)	21	17,1	15	11,9	18,8
Humidité du premier cm (p. 100 TS)	18,2	13,3	12,1	9,6	12,3
Débit (mm).....	0,65	0,32	0,24	0,15	0,18

Le stock d'eau disponible n'est donc pas seul en jeu. Au fur et à mesure du dessèchement, la surface d'absorption joue un rôle d'écran (HALLAIRE, 1953, 1956).

Il se produit ainsi un ralentissement des transports d'eau lorsque cette succion a toujours lieu au même niveau, comme le montre l'expérience suivante, réalisée sur le sol argileux, qui est celui présentant le plus de sensibilité au phénomène.

Une succion de une heure est réalisée sur des colonnes de terre de 10 centimètres, d'humidité uniforme ; puis, un profil hydrique de référence est établi (fig. 8 A). Sur les colonnes restantes, la même succion est à nouveau effectuée, d'une part sur une colonne conservée entière, et d'autre part sur des colonnes où l'on a retiré 1, 2, 3 et 4 centimètres de terre à partir de la surface d'absorption primitive.

Malgré une réserve d'eau totale moindre (fig. 8 B), après une heure, le débit est supérieur et la mobilité de l'eau meilleure, lorsque l'extraction a lieu loin de la surface initiale et que par conséquent la tranche en contact est plus humide. Il se produit le même processus que celui décrit pour les débits au paragraphe II, avec notamment l'effet de choc, davantage sensible lorsque la tranche de sol au contact de l'absorbant est susceptible de libérer plus d'eau.

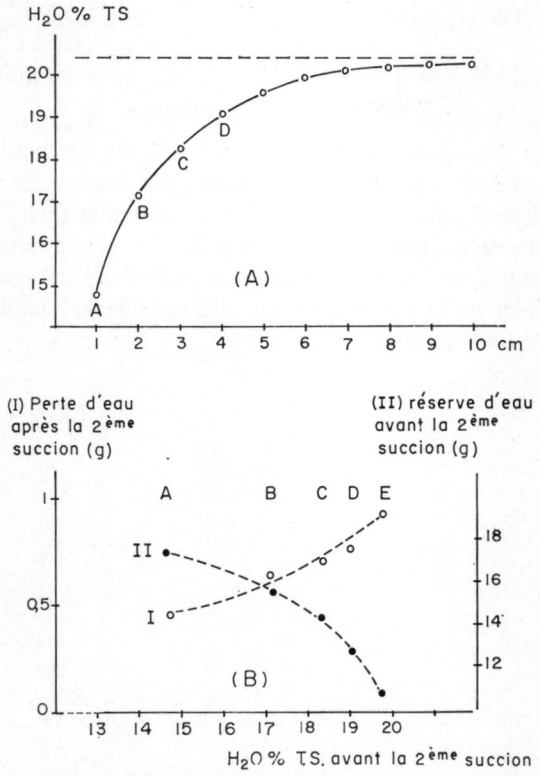


FIG. 8. — A) *Profil hydrique après* 1 *heure de succion* (gel sec)
B) *Variation de la perte en eau en fonction de l'humidité de la zone voisine de l'absorbant, après nouvelle succion de* 1 *heure*

IV. — DISCUSSION

1. *Facteurs intervenant dans la mobilité de l'eau*

Les résultats expérimentaux rapportés ci-dessus montrent que les gradients d'humidité plus ou moins importants apparaissent au sein des différentes terres étudiées et ils ont généralement tendance à se conserver ; par conséquent, le problème des critères de la mobilité de l'eau au sein de la terre se pose. Pour expliquer les phénomènes observés, on peut penser que des ruptures de films d'eau sont en cause, et aussi invoquer les phénomènes souvent observés d'hystérésis ; en effet, l'écoulement semble se faire à une extrémité selon une courbe de drainage et à l'autre selon une courbe d'humectation.

Il devient alors utile de pouvoir préciser la mobilité de l'eau sur le support sol, selon les conditions d'humidité d'une part, et de dessèchement d'autre part. Une approche de cette détermination a été tentée par l'intermédiaire du coefficient de diffusivité D, rapport entre la quantité d'eau passant à travers une section unité

perpendiculaire à l'écoulement, et le gradient d'humidité $\frac{dH}{dZ}$ au même point ($D = Q/\frac{dH}{dZ}$). Ce coefficient ne rend qu'imparfaitement compte des phénomènes puisqu'il varie avec l'humidité initiale (GARDNER, 1958; HALLAIRE, 1956-1964), mais aussi avec le temps (HALLAIRE, HÉNIN, 1958). La figure 9 illustre cela et donne les résultats obtenus avec le sol argileux par exemple. Pour pallier cette insuffisance, MORIZET (1967) a utilisé, pour comparer le comportement de différents sols, un indice α dépendant, pour une même terre et pour des conditions d'évaporation données, de la porosité et de l'humidité initiale. Cet indice peut donc caractériser le sol d'une manière globale, bien qu'interviennent au voisinage de la racine ou d'une surface absorbante des phénomènes assez complexes.

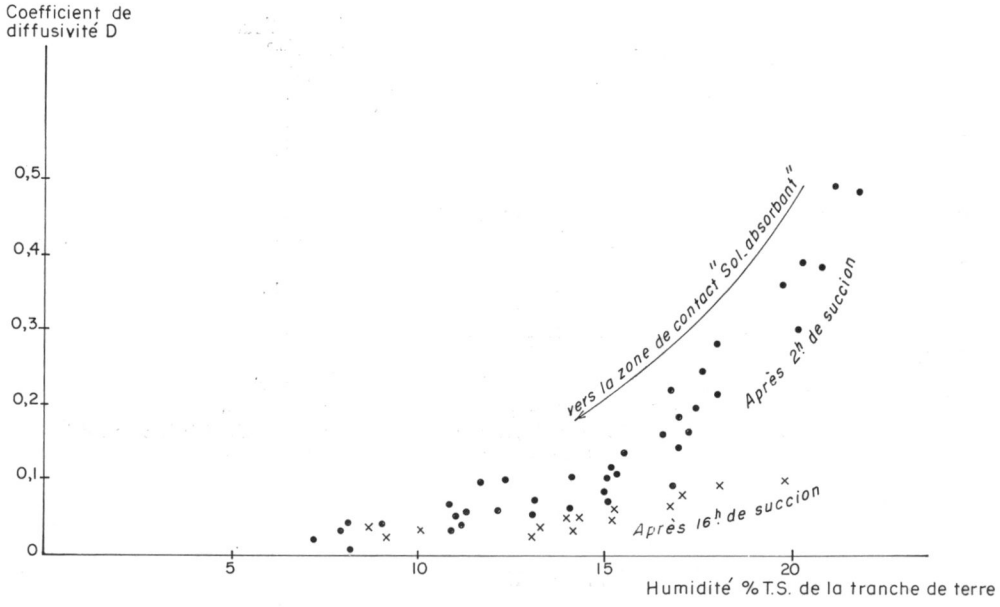


FIG. 9. — *Variation du coefficient de diffusivité en fonction de l'humidité du sol et du temps*

D'autre part, on constate que la mobilité de l'eau à tous les niveaux, qu'on peut représenter schématiquement par le rapport $\frac{A}{B} = \frac{\text{perte du 1}^{er}\text{ cm}}{\text{perte du dernier cm}}$ dépend aussi de la vitesse de dessèchement $\frac{\Delta H}{\Delta t}$. Au tableau 4, dans l'expérience sur sol argileux, le rapport $\frac{A}{B}$ croît beaucoup plus vite que la valeur de $\frac{\Delta H,}{\Delta t}$ du fait d'un gradient d'humidité élevé. Ce dernier reflète donc bien une perte de mobilité. C'est ce que montre aussi la figure 10 où est indiqué le degré d'épuisement de chaque tranche du même sol, au bout d'un temps donné, en partant d'échantillons de terre d'humidités initiales différentes, mais uniformes sur toute la colonne. Les réserves sont donc dans chaque cas identiques pour chaque cm. Si la vitesse d'extraction de l'eau est trop

forte, la transmission du mouvement par les veines liquides devient d'autant plus difficile que l'humidité de départ est plus faible. Si pour maintenir ou élever le débit, on augmente la succion, le phénomène d'amplification progressive du gradient d'humidité se produit. Le mouvement peu marqué de l'eau sur de faibles distances montre ainsi la résistance du système sol considéré (GARDNER, EHLIG, 1962).

TABLEAU 4

Vitesse de dessèchement et mobilité relative de l'eau

(cas du sol argileux)

$$\frac{A}{B} = \frac{\text{Perte du premier centimètre}}{\text{Perte du dernier centimètre}}$$

	Humidité du gel de silice			
	30 %	20 %	10 %	0 %
$\frac{\Delta H}{\Delta t}$ du sol.....	0,40	0,60	0,70	0,80
A) Perte du premier centimètre (p. 100)	0,60	1,70	2,00	2,60
B) Perte du dernier centimètre (p. 100)	0,25	0,25	0,25	0,20
$\frac{A}{B}$	2,4	6,80	8	13

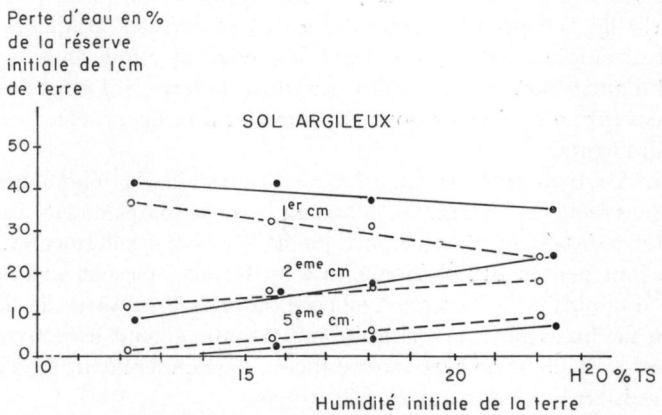


FIG. 10. — *Degré d'épuisement des tranches de sol* (3 h de succion) *en partant d'échantillons de terre d'humidité initiale différente*
(trait continu = gel sec, discontinu = gel humide)

2. *Implications relatives à l'absorption de l'eau par le système radiculaire des plantes*

D'après les résultats rapportés ci-dessus, la mobilité de l'eau, c'est-à-dire la possibilité de l'extraire plus ou moins uniformément sur tout le profil, dépend d'un certain nombre de facteurs. Elle varie avec les types texturaux et est généralement

meilleure sur les sols sableux et limoneux que sur le sol argileux. Elle est, par ailleurs, influencée par la vitesse de dessèchement, et il se dégage donc la notion de seuil critique de cette vitesse (HALLAIRE, 1953-1960) ; ce seuil varie toutefois avec les textures et l'état d'humidité. D'autre part, il faut aussi noter l'influence de l'humidité de la zone d'absorption, autrement dit l'importance de « la section efficace » dans les mouvements d'eau ; le débit peut croître d'une manière assez nette lorsqu'une zone plus humide est atteinte. Or les racines, par leur croissance et la prospection qu'elles exercent dans le sol, ont tendance à atteindre des zones à meilleure mobilité de l'eau. Cependant, comme il existe une vitesse de dessèchement critique, la progression des racines devrait pouvoir se faire à une vitesse suffisante pour dépasser les zones à gradient d'humidité marqué, donc à mouvement d'eau trop lent. Ces problèmes devront donc être abordés ultérieurement sur le végétal, après l'approche des mécanismes en jeu à partir d'un modèle.

V. — CONCLUSIONS

L'étude expérimentale sur trois types de terre, de texture différente, des mouvements de l'eau non saturante au voisinage d'une surface absorbante, permet donc de mettre en évidence son comportement en fonction de l'état d'humidité du sol, du temps, de la force de succion appliquée, des modalités d'extraction (succion continue et rôle de la durée d'interruption de la succion), de l'importance des niveaux successifs de succion au sein d'une masse de terre, etc... Il apparaît que, si le débit évolue dans le temps, il est lié à l'apparition plus ou moins rapide des gradients d'humidité ; ceux-ci, par leur ampleur, reflètent le degré de facilité de circulation de l'eau.

Il ressort d'autre part que l'humidité initiale de la terre, et l'intensité de la succion appliquée, peuvent se conjuguer pour accroître ou diminuer, selon les cas, l'importance de ces gradients.

Enfin, pour les trois sols, après arrêt de la succion, la réhomogénéisation des profils hydriques demeure très faible, même au bout de temps de latence assez longs ; une zone de terre desséchée n'arrive pratiquement pas à se réhumecter.

Ces faits font penser aux phénomènes d'hystérésis, souvent signalés, mais également à une diminution de la section efficace du fait de ruptures de films ; ces dernières seraient facilitées par une tortuosité importante, gênant le mouvement liquide, en introduisant un facteur de type « résistance », particulièrement sensible pour le sol argileux par rapport aux deux autres sols étudiés.

Enfin, le rôle de la vitesse de dessèchement devient très important car, si celle-ci est trop élevée, elle favorise l'apparition des gradients d'humidité, donc un déphasage entre la demande et les possibilités de cession d'eau du sol. Le phénomène est particulièrement sensible sur le sol argileux qui est « avare » d'eau, par rapport aux sols sableux et limoneux, beaucoup plus prodigues. Toutefois, un rythme de cession lent permet une durée de fourniture plus longue.

Les différentes terres possèdent par conséquent un débit critique, fonction de l'humidité du moment et des contraintes subies antérieurement. Aussi, pour s'adapter à cet état, le végétal soumis à une demande climatique fluctuante devrait être en

mesure de développer au sein du sol, une surface racinaire constamment suffisante pour compenser le fléchissement du débit du sol.

Cette étude sur modèle, simulant l'action des racines permet donc d'approcher en partie et progressivement du point de vue des transferts de l'eau dans les relations « sol-racines », les mécanismes en jeu. Nous essaierons d'expliciter ces derniers dans un prochain travail.

Reçu pour publication en février 1969.

SUMMARY

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE CIRCULATION OF NOT SATURANT WATER IN DIFFERENT SOILS TOWARDS AN ABSORPTION ZONE

The experimental study of the circulation of not saturant water in the soil towards an absorption zone simulating the effect of the roots has been undertaken to find the criterions of water availability on different soils, and to study the phenomenous implicated in water movement towards the roots The direct utilization of the roots being difficult, we have worked on a root model, namely silica gel, to carry out a first analysis of the water exchanges in the soil. The suction of the gel is kept invariable owing to a renovation system of the product in the contact with the earth. This has allowed us to study the water losses of different soils (argillaceous, loamy, sandy) as a function of time and different moisture states.

The study of the water profiles shows that moisture gradients frequently appear with variable intensity according to textures, time, a given moisture, the suction power, and consequently the applied drainage speed. It also appears that the water profiles with high gradients remain nearly in this state after the suction has stopped, the achomogeneization of the moisture being almost not established. However the water in the profile begins to flow again after a new suction. On the other hand, the humidity of the water extraction zone is to be considered because it represents an « effective section » conditioning the importance of the prospective flow.

Finally, the part played by drainage speed is very important because if it is too high it encourages the formation of a moisture gradient and involves progressively a difficulty for water supply from the most remote earth slices. So, there is a kind of resistance to water movement and it is very sensible on argillaceous soil and, to a lower degree, on loamy and sandy soils.

These different facts have been compared and studied experimentally; a more theoretic interpretation will be made in a next study.

ZUSAMMENFASSUNG

EXPERIMENTALE UNTERSUCHUNG DES UMLAUFS DES NICHTSÄTTIGENDEN WASSERS VON VERSCHIEDENEN BÖDEN IN RICHTUNG EINER ABSORPTIONSZONE

Die Experimentale Untersuchung des Umlaufs des nichtsättigenden Wassers des Bodens in Richtung einer Absorptionszone unter Nachahmung der Wurzelwirkung wurde unternommen, um die Kriterien der Disponibilität von Wasser auf verschiedenen Böden und die vorhandenen Phänomene der Bewegung des Wassers in Richtung der Wurzeln zu bestimmen. Da die direkte Benutzung der Wurzeln heikel und schwierig ist, haben wir zwecks Durchführung einer ersten Analyse für die Wasser-übertragungen im Boden als Wurzelmuster das Kieselerdegel gewählt. Die Saugewirkung des Gels wurde dank eines Erneuerungs systems des Prokuktes in Berührung mit der Erde Konstant gehalten. So wurde es möglich, die Verluste an Wasser der verschiedenen Böden (tonhaltig, lehmig, sandig) in Abhängigkeit der Zeit und für verschiedene Feuchtigkeitszustände zu untersuchen.

Die Untersuchung der hydrolytischen Profile zeigt ein häufiges Auftreten von Feuchtigkeitsgradienten, deren Wert je nach dem Gefüge, dem Wetter, der betrachteten Feuchtigkeit, der Saugkraft und infolgedessen der angewandten Austrocknungsgeschwindigkeit wechselt. Es scheint auch, dass

die hydrolytischen Profile mit starkem Gradient ungefähr in demselben Zustand nach Anhalten des Saugens sich erhalten. Eine Wiederhomogenisierung der Feuchtigkeit tritt fast nicht auf. Jedoch setzt sich das Profilwasser nach einem neuen Saugen wieder in Bewegung. Anderseits muss die Feuchtigkeit der Wasserextraktionszone berücksichtigt werden, denn sie stellt einen « wirksamen Abschnitt » dar, der die Grösse der möglichen Wassermenge bedingt.

Schliesslich ist die Rolle der Austrocknungsgeschwindigkeit sehr wichtig. Ist sie zu gross, so begünstigt sie das Auftreten eines Feuchtigkeitsgradients und bringt mit sich in zunehmender Weise ein Hindernis in der Freigabe des Wassers der entferntesten Bodenschichten. Es gibt also einen gewissen Widerstand gegen die Wasser-bewegung, der bei tonhaltigen Böden besonders kräftig wirkt, auf lehmigen und sandigen Böden jedoch weniger wirksam ist.

Diese verschiedenen Tatsachen werden verglichen und in experimentaler Hinsicht besprochen. Eine mehr theoretische Ausdeutung wird Gegenstand einer nächsten Untersuchung sein.

Экспериментальное изучение передвижения ненасышающей влаги различных почв к зонам поглощения.

Ж. ПЮЭШ.

РЕЗЮМЕ

Для изыскания критериев доступности влаги в различных почвах и уточнения явлений приводимых в действие движением воды к корням, автор предпринял экспериментальное изучение передвижения ненасышающей влаги почв к зонам поглошения симулировавшим действие корней. В виду того что применение настоящих корней представляло непреодолимые трудности, он употребил для первого анализа передачи влаги в почве, силикатный гель являющийся как-бы моделью корня. Всасывающая сила этого геля поддерживалась на постоянном уровне системой возобновления контакта этого продукта с почвой, что и позволило изучить водные потери разных почв (глинистых, суглинистых, песчаных) во времени и при различных состояниях влажности.

Изучение профилей влажности указывает на частое появление градиентов влажности разных величин в зависимости от механического состава почв, времени, рассматриваемой влажности, силы отсасывания и следовательно, примененной скорости извлечения влаги. Выяснилось что профили влажности имеющие крупные градиенты продолжают пребывать в том-же приблизительно состоянии, даже после остановки отсасывания, ибо полного перераспределения влаги не происходит. И тем не менее, влага снова приходит в движение при новом отсасывании. С другой стороны, нужно принять во внимание влажность зоны извлечения влаги, ибо она представляет « эффективный разрез » обуславливающий величину возможного расхода влаги. Кроме того, роль скорости высыхания тоже очень важна, ибо когда это последнее протекает слишком быстро, оно содействует появлению градиента влажности и прогрессивно затрудняет отдачу влаги наиболее отдаленными пластами почвы. Существует значит какое-то противодействие продвижению влаги, особенно чувствительное в глинистых почвах, и менее — в почвах суглинистых и песчаных. Автор сопоставляет все эти факты и рассматривает их с точки зрения эксперимента; об'яснение более теоритическое явится предметом следующей работы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALLIF L., FEODOROFF A., HÉNIN S., 1966. Distinction des transferts d'eau à l'état liquide ou vapeur d'eau au cours du dessèchement d'un sol nu. *C. R. Acad. Sci.*, **263**, 1958-1960.

BLANCHET R., 1968. La nutrition des plantes. *B. T. I.* **231**, 253-539.

CHARLOT G., 1961. Les méthodes de la chimie analytique. *Analyse quantitative minérale*, **4**, 684-685. Éd. Masson, Paris.

COLLIS-GEORGE N., HÉNIN S., KELLY J. A., 1963. Étude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **273**, 242-244.

COWAN I. R., 1965. Transport of water in the soil plant atmosphere system. *J. appl. Écol.*, **2**, 221-239.

FEODOROFF A., RAFI M., 1962. Évaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Les trois stades de l'évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **235**, 3220-3222.

FEODOROFF A., RAFI M., 1962. Évaporation de l'eau d'un sol nu. Évolution des profils hydriques. *C. R. Acad. Sci.*, **235**, 3468-3470.

GARDNER W. R., 1958. Mathematics of isothermal water conduction in unsatured soil. *Highway Res. board. S. R.* **40**, 78-87.

GARDNER W. R., EHLIG C. F., 1962. Impedance to water movement in soil and plant. *Science*, **138**, n° 3539, 522-523.

GARDNER W. R., 1965. Dynamic aspects of soil water availability to plants. *Ann. Rev. plant physiol.*, **16**, 323-342.

HALLAIRE M., 1953. Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. *Ann. agron.*, **11**, 143-244.

HALLAIRE M., 1956. La diffusion de l'eau dans le sol sous les deux formes liquide et vapeur au voisinage de la surface d'évaporation. *VIe Congr. internation. Sci. Sol.* Éd. Laboureur, Paris, 337-344.

HALLAIRE M., HÉNIN S., 1958. Dessèchement du sol et évolution des profils hydriques. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 2151-2153.

HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Physiol. vég.*, **2**, 119-130.

HALLAIRE M., 1964. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. In : *L'eau et la production végétale*, 15-25. I. N. R. A., Paris.

HALLAIRE M., 1968. Mécanisme et rythme de dessèchement du sol. *Internation. Soil water Symp.*, Prague, 17-34.

KRUYT H. R., 1933. *Les colloïdes*, 329 p. Alcan, Paris.

MORIZET J., MILLET R., 1967. Comparaison de profils hydriques obtenus sur deux terres différentes, à partir d'essais en laboratoire. *C. R. Acad. Agric.*, 46-53.

MORIZET J., 1967. Étude de la circulation de l'eau non saturante dans différentes terres en régime de dessèchement. *Ann. agron.*, **18**, 267-383.

PUECH J., 1966. Modalités de la dessiccation des sols par le gel de silice. *C. R. Acad. Sci.*, **263**, 645-648.

Ann. agron., 1969, **20** (3), 263-276.

ACTION DE LA NUTRITION MINÉRALE SUR L'ÉCONOMIE DE L'EAU DANS LA PLANTE

I. — Équilibre absorption-transpiration

M. MINGEAU

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques de Clermont-Ferrand
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Dans le cadre général de l'influence de l'alimentation minérale sur le comportement hydrique de la plante, l'auteur a plus particulièrement étudié l'action des carences minérales sur l'absorption de l'eau et sur les déséquilibres hydriques qui en résultent.

INTRODUCTION

L'analyse des rapports entre la nutrition minérale et le comportement hydrique de la plante, outre l'intérêt qu'elle présente sur le plan fondamental pour la connaissance de certaines conséquences des perturbations métaboliques, doit déboucher à terme sur la mise au point de méthodes permettant la valorisation maximale de ce facteur de production précieux que représente l'eau pour l'agriculture.

Le point de départ de cette première étude est le suivant : on sait déjà que, sous un pouvoir évaporant donné, les deux types d'échange gazeux existant entre la plante et l'atmosphère ambiante, sortie de vapeur d'eau (= transpiration) d'une part, et entrée de gaz carbonique (= photosynthèse apparente) d'autre part, sont liés très étroitement (de Parcevaux, 1963 ; Gaastra, 1959 ; Chartier, 1967 ; Robelin, 1962). Il a d'ailleurs été montré, dans le cas du facteur eau, une relation de proportionnalité et une constance du rapport $\frac{\text{Photosynthèse}}{\text{Transpiration}}$; récemment, Robelin (à publier) a montré qu'en condition hydrique satisfaisante, l'effet de carences

minérales se traduit également par une diminution simultanée de la transpiration et de la photosynthèse par unité de surface foliaire. Le rapport $\frac{\text{Photosynthèse}}{\text{Transpiration}}$ garde une valeur sensiblement constante et identique à celle observée en conditions nutritionnelles normales (fig. 1).

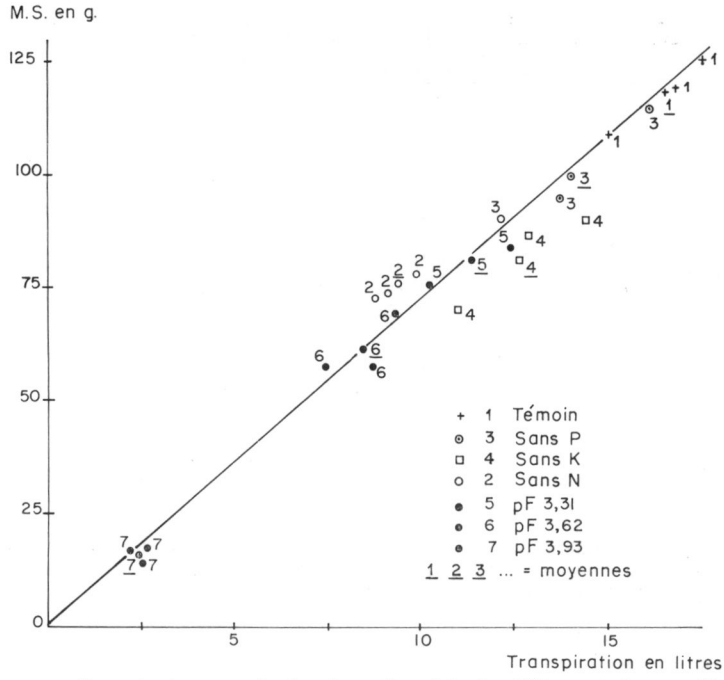


FIG. 1. — *Transpiration et production de matière sèche des différents traitements* (ROBELIN)

Dans le cas de l'alimentation hydrique, l'hypothèse explicative peut être aisément trouvée à partir des connaissances acquises sur le mécanisme de régulation hydropassive de l'ouverture stomatique ; la variation de résistance stomatique freine, à la fois et de façon proportionnelle, le départ de vapeur d'eau et l'entrée de gaz carbonique.

Dans le cas de l'alimentation minérale, la covariation photosynthèse-transpiration implique de même l'intervention de la régulation stomatique ; mais de quelle manière devons-nous alors comprendre le déclenchement de ce mécanisme ?

Une alimentation minérale carencée va agir dans le sens d'une perturbation du métabolisme, et dans le cadre du comportement hydrique d'un végétal on peut envisager son action soit sur l'absorption hydrique, soit sur la transpiration, soit sur ces deux processus :

— La nutrition minérale agit sur la vitesse de photosynthèse, celle-ci tient sous sa dépendance la teneur en gaz carbonique au niveau des stomates et par conséquent la régulation stomatique (BASTIN, 1967 ; BINET et BRUNEL, 1967). De même, il est possible de penser à une action directe sur l'équilibre acido-basique des cellules stomatiques.

— Les carences minérales interviennent sur la vitesse d'absorption de l'eau et ce sont les variations de l'état hydrique de la plante qui commandent les mouvements stomatiques.

— Ces deux hypothèses ne s'excluent pas mutuellement car si une perturbation importante de l'état d'hydratation des tissus suffit à expliquer la chute de transpiration, la régulation stomatique peut elle-même se trouver sous la dépendance des variations de photosynthèse résultant de la diminution du taux d'hydratation.

Dans la première série d'essais présentés ici, nous avons cherché essentiellement à mettre en évidence une action éventuelle de la nutrition minérale sur le bilan hydrique du végétal, c'est-à-dire sur l'évolution simultanée de la transpiration et de l'absorption de l'eau.

I. — MÉTHODES

Principe

Il est nécessaire, compte tenu de l'objet défini plus haut, de mesurer simultanément les deux termes du bilan hydrique, c'est-à-dire la perte d'eau par transpiration et le gain d'eau par absorption. Sous un pouvoir évaporant donné, le niveau de transpiration pourra résulter, selon les hypothèses faites, soit d'un certain état physiologique des feuilles, soit des possibilités d'équilibre avec l'absorption. La simple observation du niveau transpiratoire en condition d'équilibre ne peut introduire aucune indication permettant un choix entre les différentes hypothèses. Il faut donc se placer en dehors de ces conditions, c'est-à-dire suivre le comportement de la transpiration et de l'absorption en période de forte fluctuation de ces termes et observer l'évolution de chacun d'eux selon le facteur nutritionnel imposé.

On pourrait, par exemple, suivre ce qui se produit lors d'une brutale variation du pouvoir évaporant ou, et c'est la solution que nous avons choisie, situer l'observation au moment où la plante passe de l'obscurité à la lumière ; les stomates s'ouvrent, le flux transpiratoire s'élève fortement, c'est sans doute le moyen le plus simple de provoquer les variations souhaitées.

Pour simplifier quelques raisonnements ultérieurs, nous écrivons les équations caractéristiques de la transpiration T et de l'absorption A :

On a d'une part :

$$T = k_1 \frac{\Delta\psi T}{r_T} \qquad (1)$$

avec $\Delta\psi T = \psi_a - \psi_f$

ψ_a = potentiel de l'eau dans l'air (plusieurs centaines d'atmosphères)
ψ_f = potentiel de l'eau dans les feuilles (quelques atmosphères)
k_i = coefficient ayant les dimensions d'une diffusibilité
rT = somme des résistances au passage de l'eau de la surface des cellules à l'atmosphère,

essentiellement :

r_s = résistance stomatique
r_e = résistance dans la couche limite

et d'autre part :

$$A = k_2 \cdot \frac{\Delta\psi A}{r_A} \qquad (2)$$

avec $\Delta\psi A = \psi_f - \psi_m$

ψ_m = potentiel de l'eau dans la solution nutritive = pression osmotique de la solution nutritive (0,25 atmosphère)
r_A = somme des résistances au cheminement de l'eau dans les plantes.

A chaque instant, la transpiration et l'absorption dépendent à la fois de la différence de potentiel de l'eau entre les deux bornes du circuit relatif à T ou A et des résistances rencontrées entre ces bornes.

Nous avons utilisé la méthode potométrique. La quantité d'eau absorbée par les racines, pendant un laps de temps donné, s'évalue par la variation volumétrique de l'eau contenue dans le potomètre (lecture directe sur un tube gradué) ; la quantité d'eau transpirée est appréciée par la variation de poids du potomètre entre deux lectures.

Les lectures débutent à l'obscurité, c'est-à-dire stomates fermés, flux transpiratoire et absorption faibles ; l'ouverture stomatique est provoquée en éclairant les plantes et nous contrôlons ce qu'il en résulte au point de vue absorption et transpiration.

Conditions expérimentales

Les plantes sont placées dans une enceinte ventilée où un ensemble de 10 tubes fluorescents de 80 watts *(Atlas Tropical Day Light)* et 15 lampes à incandescence de 15 watts fournissent un éclairement moyen au niveau des plantes de 9 000 lux (luxmètre F. Guerpillon type 490) ou un flux énergétique de 0,17 $cal \cdot cm^{-2} \cdot mn \cdot^{-1}$ (Pyrrhéliomètre Kipp et Zonen). Pendant la période diurne (12 h), l'humidité relative de l'air est maintenue à 60 p. 100 ± 2 p. 100 à l'aide d'un hygrostat pouvant déclencher une pulvérisation d'eau.

Cette installation ne comporte pas de système de régulation de la température et ainsi, pendant la période de mesure (2 heures en moyenne), des élévations de température comprises entre 3 et 5°C sont enregistrées. La mesure d'absorption étant une mesure volumétrique, l'interférence due à la variation de température est annulée en plaçant dans le dispositif un potomètre sans plante qui permettait d'effectuer des corrections sur l'absorption apparente mesurée. En moyenne, la valeur de ces corrections est de 0,04 cm^3 pour une variation de température de 0,3°C sur une durée de 10 minutes.

Pour tous ces essais, les plantes sont cultivées sur solution nutritive équilibrée de concentration moyenne en anions et cations égales à 30 méq/l (tabl. 1). Après germination, les plantules sont placées sur boîtes individuelles dans lesquelles la solution nutritive est aérée périodiquement (10 minutes par heure). La fréquence de renouvellement des solutions est fonction de l'âge de la plante et du volume de solution mis à sa disposition.

TABLEAU I

Caractéristiques de la solution nutritive utilisée

Pourcentage des ions (en équivalents)

Anions : NO_3^- (69 %) — $PO_4H_2^{-}{}^{-}$ (15 %) — SO_4^- (15 %) — Cl^- (1 %)

Cations : K^+ (50 %) — Ca^{++} (19 %) — Mg^{++} (15 %) — NH_4^+ (15 %) — Na^+ (1 %)

pH de la solution : 6,2

Oligo-éléments (en mg/l)

Fe (citrate)	4,0	SO_4Zn, 7 H_2O	0,88
SO_4Mn, 1 H_2O	0,61	SO_4Cu, 5 H_2O	0,19
Ac. borique	0,56	Molybdate NH_4	0,10

Les plantes reçoivent une alimentation minérale complète pendant une durée moyenne d'un mois. Un contrôle basé sur la transpiration individuelle au cours des 48 heures précédant la différenciation des traitements, permet de choisir un lot de plantes homogènes. Au début de l'essai, des solutions nutritives spécifiques (complètes pour les témoins, carencées en divers éléments pour les traitées) sont placées dans le potomètre. Dans le cas de la carence totale, du polyéthylèneglycol (Carbowax 1 500) est ajouté à l'eau permutée pour ajuster la pression osmotique des deux milieux liquides au même niveau. Il n'existe pas de risque d'absorption de Carbowax par les racines et donc de variation de la pression osmotique de la sève par suite de la faible quantité ajoutée et de la durée réduite de l'essai (JANES, 1961 ; RUF et *al.*, 1967)

Matériel (1)

Les potomètres utilisés sont réalisés à partir d'erlenmeyers de 500 cm^3, modifiés par l'adjonction, à la partie inférieure, d'un tube vertical amovible (fig. 2 *a*). Nous disposons de deux séries de tubes gradués permettant une précision de lecture voisine de 0,01 à 0,03 cm^3 suivant le diamètre du tube.

(1) Il est analogue dans son principe à celui utilisé par M. CRUIZIAT, Station centrale de Bioclimatologie à Versailles mais nous l'avons adapté à nos conditions d'utilisation.

La tige de la plante est maintenue par un bouchon de caoutchouc, l'étanchéité à ce niveau étant assurée par un joint en Terostat, matière inerte vis-à-vis des végétaux et assez souple pour permettre une croissance modérée de la tige. Entre le bouchon et le col du potomètre, nous luttons au moyen de Rhodorsil CAF 4 (fig. 2 *b*).

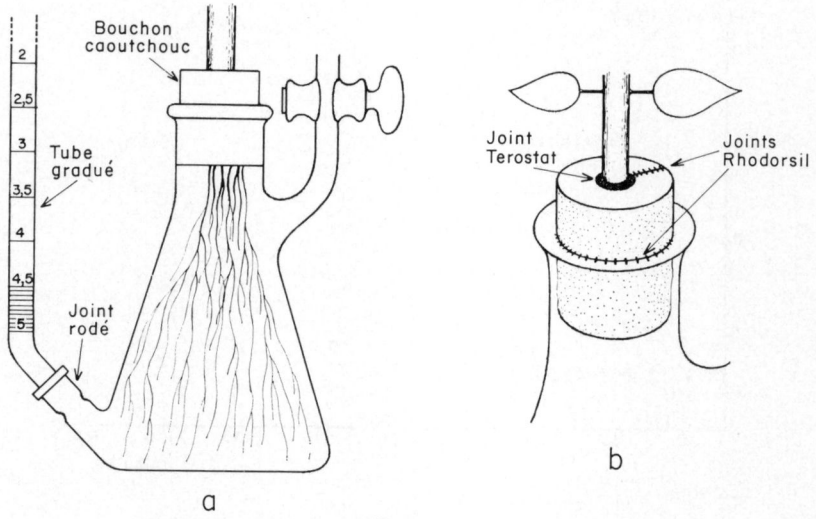


FIG. 2.
a) Potomètre muni du tube gradué de mesure
b) Détail du bouchon avec la tige et les joints d'étanchéité

La détermination des quantités d'eau transpirée s'effectue par pesée du potomètre sur une balance de portée 1 200 g et de précision 0,02 g, comparable à celle disponible pour les mesures d'absorption.

Le Tournesol a été choisi comme matériel végétal, en raison des nombreux avantages qu'il présente dans ce genre d'essais (transpiration par unité de surface foliaire importante — port horizontal des feuilles — bonne adaptation au milieu liquide — tige cylindrique sans gaine foliaire). Pour chacun des traitements, le comportement de 2 ou 3 plantes a été contrôlé, comportement qui s'est avéré reproductible d'une plante à l'autre.

II. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

Comportement en solution nutritive complète

La figure 3 *a* donne un exemple de comportement d'une plante sur solution nutritive complète. A l'obscurité, les valeurs d'absorption relevées sont, en général, très légèrement supérieures à la transpiration.

A l'allumage des lampes, on observe pendant une période d'environ 20 minutes une augmentation très rapide de la transpiration due à l'ouverture photo-active des stomates ; r_s va diminuer et entraîner une augmentation de $\frac{\Delta\psi_T}{r_s}$. L'absorption croît aussi mais avec un certain décalage dans le temps sur la courbe de transpiration (EHRLER et *al.*, 1966) ; la transpiration étant supérieure à l'absorption, ψ_f croît et provoque l'augmentation de $\frac{\Delta\psi A}{r_a}$.

La transpiration, après avoir atteint une valeur maximale, est déprimée assez fortement ; en effet l'existence d'un maximum de (T-A) entraîne un maximum de ψ_l et donc une régulation stomatique par augmentation de r_s ; l'absorption continue à

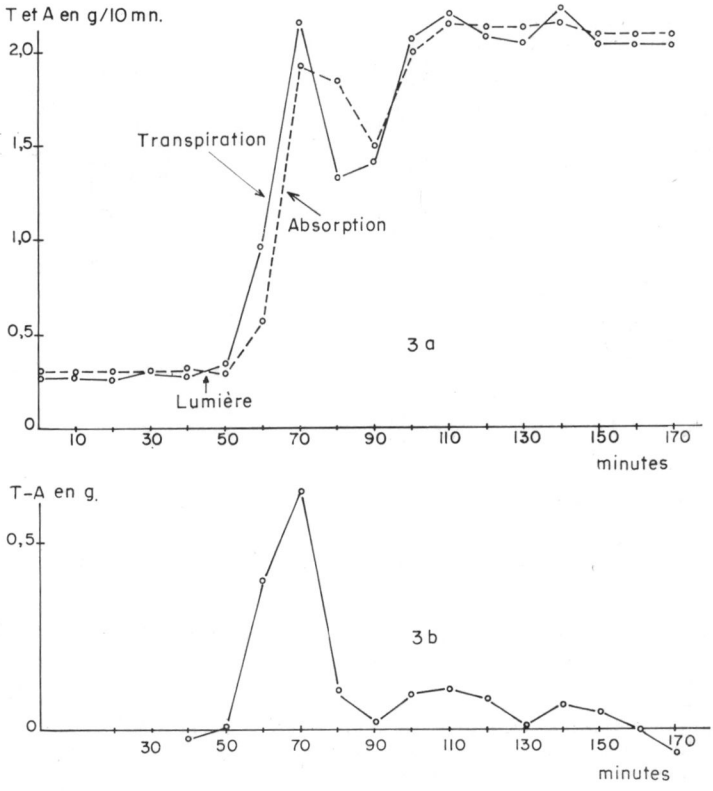


FIG. 3. — *Comportement en solution nutritive complète*
a) Absorption et transpiration instantanées
b) Évolution du déficit hydrique (transpiration-absorption)

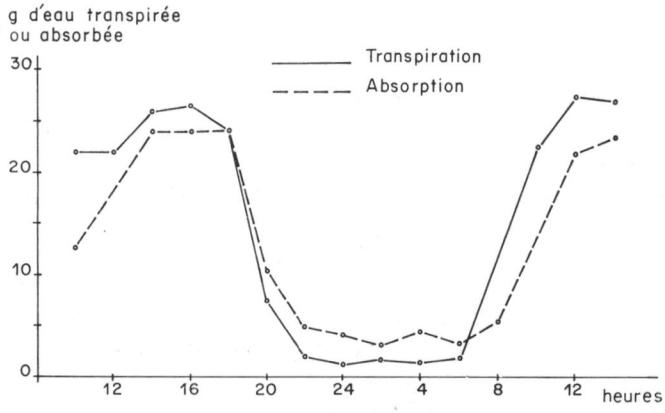


FIG. 4. — *Relation entre la transpiration et l'absorption pendant une journée* (KRAMER)

augmenter légèrement puis, à son tour, elle va être limitée par le niveau de transpiration mais en restant à un taux supérieur à celui de la transpiration. Cette deuxième période dure entre 20 et 30 minutes ; elle correspond à une « phase de rééquilibrage », il y a alors compensation à peu près complète du déficit hydrique (fig. 3 *b*).

Par la suite, on observe un « chassé-croisé » des deux courbes, les valeurs de transpiration et d'absorption enregistrées présentent peu de différence entre elles.

Nos observations tendent à montrer un équilibrage rapide entre transpiration et absorption ; les expériences de KRAMER, conduites sur sol, font apparaître un déphasage permanent entre absorption et transpiration (fig. 4) mais cet auteur introduit dans son système des résistances additionnelles se situant au niveau du sol et augmentant énormément l'inertie du système (KRAMER, 1937).

On voit donc ainsi que les déphasages entre absorption et transpiration seront particulièrement visibles pendant cette première phase d'accroissement de la transpiration.

Influence des différentes carences

Carence totale.

Comportement en début d'expérience.

Dès le transfert sur eau permutée, une première série de mesures est effectuée mais on constate une évolution des courbes transpiration-absorption identique pour les témoins et les traités.

Après 24 heures de traitement (fig. 5 *a*), le comportement se différencie. La transpiration des plantes carencées augmente comme précédemment très vite pour atteindre, après 20 minutes d'éclairage, un maximum proche de celui des jours précédents (1,56 g/10 mn pour 1,70). Par contre, l'absorption reste très en retrait provoquant un déséquilibre hydrique important (bilan négatif de 1,5 g d'eau en 30 minutes). On observe alors une diminution de la transpiration jusqu'à un niveau très bas (0,50 g/10 mn) ; puis, lorsque l'excédent d'absorption par rapport à la transpiration a comblé la majeure partie du déficit hydrique, la transpiration augmente à nouveau faiblement.

La comparaison des courbes obtenues après 3 jours de traitements (fig. 5 *b*) montre un comportement sensiblement identique. Cependant, le pic dans la courbe de transpiration se situe à un niveau plus bas (1,40 g/ 10 mn) ; malgré cela, le déficit du bilan hydrique augmente par suite du déphasage croissant entre absorption et transpiration.

La faible variation de la transpiration sous l'action de la nutrition minérale en phase d'ouverture stomatique laisse supposer que ces facteurs n'ont qu'une action limitée sur le comportement des stomates.

L'absorption est freinée énormément dès le deuxième jour d'expérience. La pression osmotique de la solution restant constante, le déséquilibre du bilan hydrique entraîne une augmentation du potentiel de l'eau dans les feuilles (ψ_f) et par conséquent de $\Delta\psi A$. Les résistances au niveau de l'absorption ont donc augmenté très fortement.

Nous sommes portés à penser, étant donné la nature du facteur d'action (alimentation minérale) que les résistances touchées sont de nature biologique. Les résistances rencontrées jusqu'à l'endoderme sont essentiellement de nature physique

puisqu'il s'agirait d'un cheminement au travers des structures végétales inertes définissant un « espace libre » (*free space*). Les processus de nature biologique doivent intervenir surtout au niveau de l'endoderme.

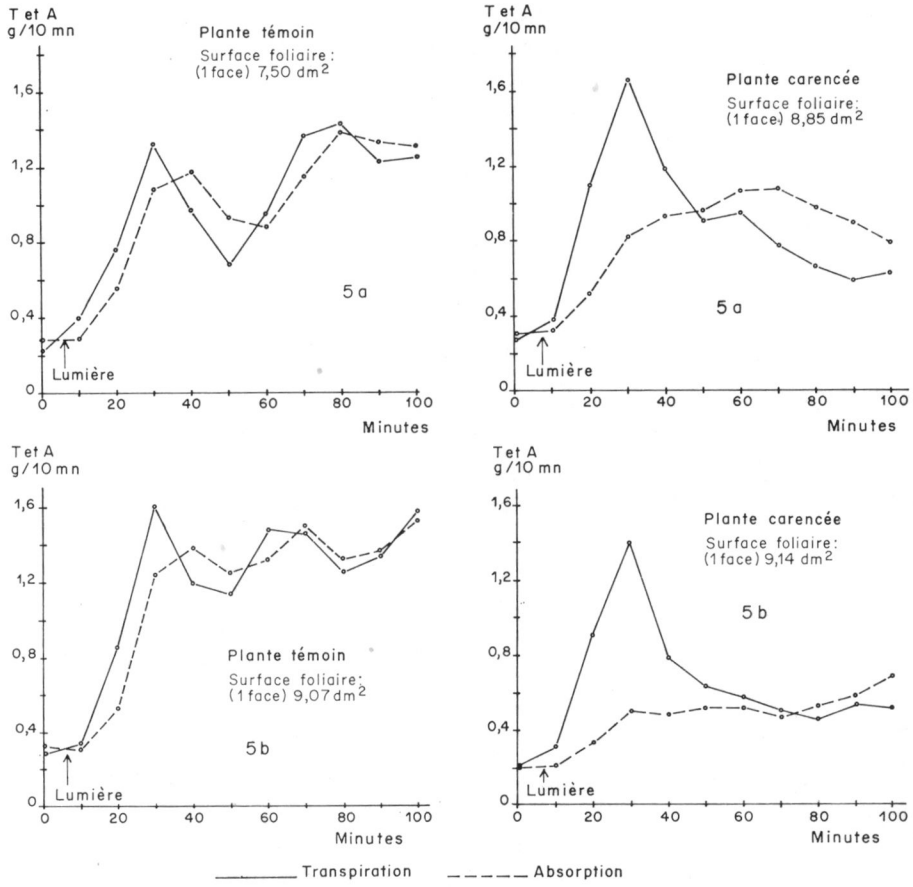


FIG. 5. — *Comportement en solution nutritive complète et sur eau permutée*
a) Transpiration et absorption après 24 heures de traitement
b) Transpiration et absorption après 72 heures de traitement

On est surpris de constater le maintien d'un flux transpiratoire élevé en présence d'une absorption faible ; il serait plus logique d'observer, étant donné l'importance et la rapidité d'établissement du déficit physique, une mise en œuvre extrêmement rapide de la régulation stomatique bloquant le pic de transpiration à un niveau beaucoup plus bas.

Devant les faits, on doit admettre soit que dans cette première phase, la régulation hydroactive n'est pas en jeu, soit que la vitesse de réponse à ce mécanisme est fortement altérée par la carence minérale (ARLAND, 1952 ; MIKHAELIS, 1964).

Malgré tout, le phénomène de régulation stomatique lié au déficit hydrique se produit de façon très marquée et, pendant les premières cent minutes d'observations, abaisse le niveau de la transpiration très fortement par rapport au témoin.

Comportement global.

La transpiration diurne totale est beaucoup moins abaissée que la transpiration au bout de 90 minutes (tabl. 2) ; ceci implique une augmentation progressive du niveau de transpiration en cours de journée. Cependant, l'écart de transpiration diurne totale entre témoin et traité s'accroît d'une journée à l'autre ; ce fait a déjà été signalé par ROBELIN dans ses expériences.

TABLEAU 2

Transpiration instantanée après 90 minutes d'éclairage (T_i) et transpiration diurne moyenne (T_m)

		Témoin		Traité		Témoin		Traité	
		g/h/dm²	Ind.	g/h/dm²	Ind.	g/h/dm²	Ind.	g/h/dm²	Ind.
Début traitement (t)	T_i....	0,92	100	1,14	124	0,90	100	1,07	119
	T_m ..	1,50	100	1,71	114	1,55	100	1,66	107
t + 24 h	T_i....	1,06	100	0,51	48	0,96	100	0,76	79
	T_m ..	1,42	100	1,11	78	1,28	100	1,15	90
t + 48 h	T_i....	1,29	100	0,59	46	1,30	100	0,60	46
	T_m ..	1,61	100	1,24	77	1,46	100	1,20	82

L'effet de la carence minérale sur le déséquilibre est donc transitoire ; il se produit, au cours du temps, une adaptation progressive de l'absorption permettant l'établissement d'un niveau d'équilibre de transpiration croissant.

N. B. — Chez les plantes carencées, on a noté la suppression du phénomène de guttation, ce qui est en accord avec d'autres observations (FREY-WISLING, 1935 ; RALEIGH, 1946 ; DREW, 1967). La guttation est affectée par les mêmes facteurs que la pression radiculaire mais elle dépend encore plus de l'équilibre entre transpiration et absorption. Il est vraisemblable que le milieu liquide carencé entraîne rapidement la suppression de la pression radiculaire donc de la composante active de l'absorption hydrique.

Carence azotée.

L'effet du traitement n'apparaît qu'après 48 heures (fig. 6 *a*) ; l'absorption présente un décalage un peu plus marqué sur la transpiration et les deux courbes montrent une évolution assez irrégulière au cours du temps (allure en dents de scie).

Après 72 heures de traitement (fig. 6 *b*), on note chez les plantes carencées en azote, une réaction semblable à celle déjà rencontrée en carence totale. Au facteur temps près, le seul fait nouveau se trouve dans l'accentuation des oscillations plus ou moins déphasées de l'absorption et de la transpiration en période de palier ; ce sont apparemment les premiers signes de difficultés d'adaptation de l'une à l'autre et d'établissement d'un équilibre. Ces manifestations échappaient à l'observation en cas de carence totale en raison de la rapidité de la réponse.

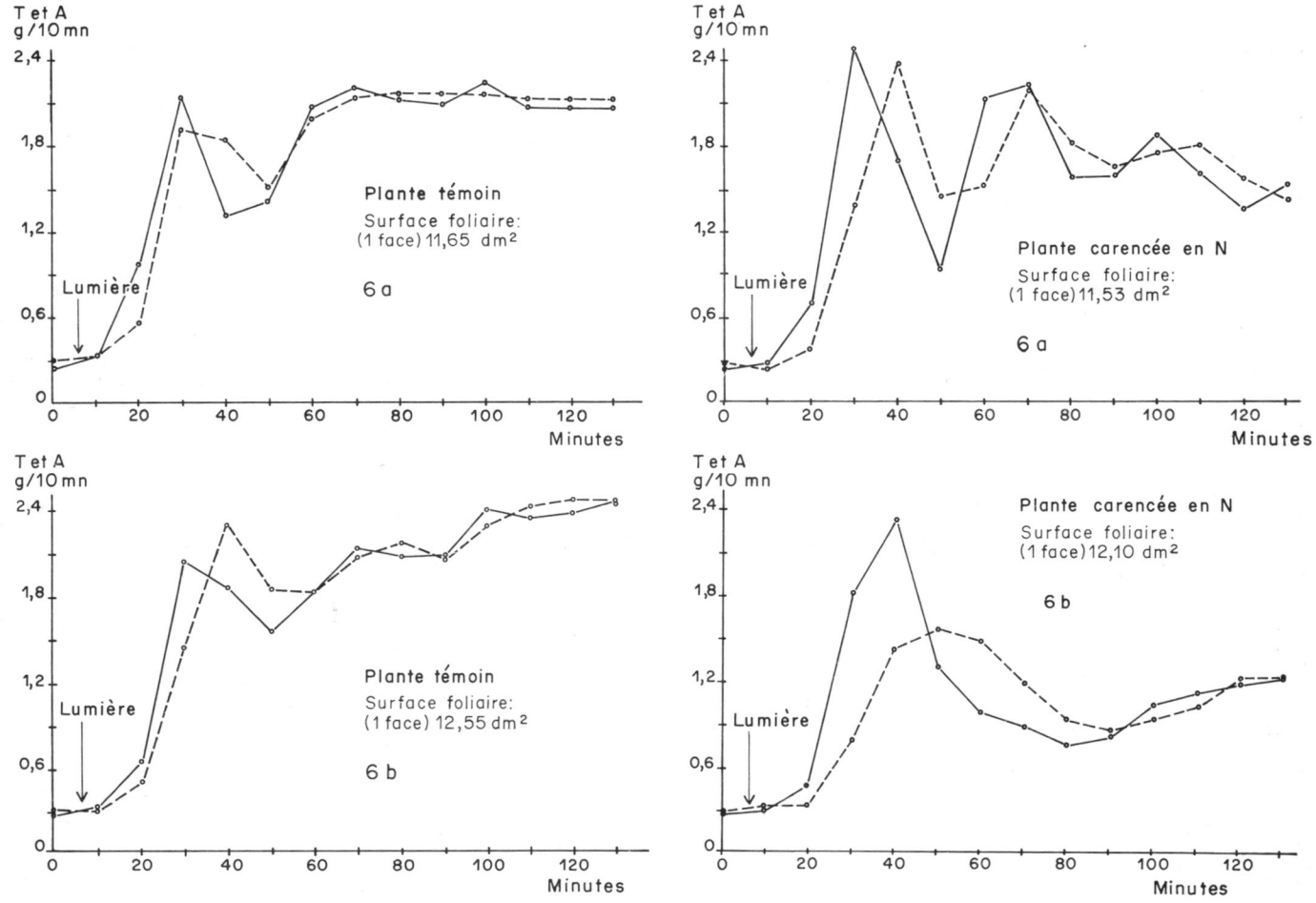


FIG. 6. — *Comportement en solution nutritive complète et en solution carencée en N*
a) Transpiration et absorption après 48 heures de traitement
b) Transpiration et absorption après 72 heures de traitement

Carences potassique et phosphatée.

Après une semaine de carence en potassium et en phosphore, aucune différence n'a été obtenue dans l'évolution des courbes de transpiration et d'absorption chez les plantes traitées. Cependant, en fin d'expérience, les plantes carencées manifestent par rapport aux témoins des signes de carence évidente par leur croissance et par les manifestations extérieures sur feuilles.

Dans le cas de la carence en potassium, on a noté une certaine tendance vers une augmentation du débit transpiratoire au moment de l'allumage et une légère augmentation de la transpiration moyenne pour l'ensemble de la journée (tabl. 3). La carence potassique semble entraîner un comportement opposé à celui observé en carence azotée.

TABLEAU 3

Niveaux de transpiration T_i (transpiration au cours des 90 minutes suivant l'éclairage) *et* T_m (transpiration diurne moyenne)

		Témoin		Carencé en K		Témoin		Carencé en K	
		g/h/dm²	Ind.	g/h/dm²	Ind.	g/h/dm²	Ind.	g/h/dm²	Ind.
Début traitement (t)	T_i....	0,81	100	1,0	123	0,83	100	0,88	106
	T_m ..	1,55	100	1,60	103	1,45	100	1,44	99
t + 24 h	T_i....	0,90	100	1,02	113	0,87	100	1,07	123
	T_m ..	1,55	100	1,63	105	1,40	100	1,60	114
t + 48 h	T_i....	1,0	100	1,16	116	0,99	100	1,35	136
	T_m ..	1,72	100	1,78	103	1,56	100	1,90	122

La variation des résistances se situe-t-elle au niveau de la régulation stomatique ou au niveau de l'absorption radiculaire ? Il est difficile de trancher actuellement d'autant plus qu'une diminution de résistance radiculaire aura en définitive une répercussion sur la régulation stomatique. Cependant, les travaux de certains auteurs (SPEIDEL, 1939 ; MAC DOWALL, 1964 ; OKAMOTO, 1963-1966) et nos observations personnelles montrent qu'au moins, au niveau des résistances de nature biologique, la carence potassique joue vers leur diminution.

CONCLUSION

Nous avions suggéré plusieurs hypothèses pour expliquer le fonctionnement de la régulation stomatique chez une plante soumise à une alimentation minérale déficiente. Les résultats obtenus sur eau permutée et sur solution nutritive dépourvue d'azote prouvent que certaines carences minérales interviennent fortement sur la vitesse d'absorption hydrique. Les mouvements stomatiques sont probablement commandés par un déséquilibre intense entre la demande et l'offre. La rapidité de réponse des stomates à la variation de l'état hydrique des tissus semble cependant diminuée par la carence minérale.

Il est donc certain qu'un état de carence totale ou azotée entraîne une perturbation importante de l'état d'hydratation des tissus, tout au moins avant que ne s'établisse un équilibre entre la transpiration et l'absorption. Ce phénomène suffirait en lui-même à expliquer la chute de transpiration mais il n'exclue pas que la régulation stomatique soit elle-même à plus longue échelle de temps sous la dépendance des variations de photosynthèse résultant de la diminution d'une part du taux d'hydratation et d'autre part de l'approvisionnement en métabolites.

Par contre, aucune action très notable n'a été relevée en ce qui concerne les facteurs de nutrition phosphatée ou potassique ; seule la carence potassique semble jouer, au contraire de la carence azotée, dans le sens d'une diminution des résistances à la circulation de l'eau dans la plante.

Ces premiers essais nous confirment dans l'idée que le comportement hydrique de la plante, soumis dans ses grandes lignes, aux conditions extérieures purement physiques, peut être cependant influencé par les facteurs intervenant sur son métabolisme.

Reçu pour publication en avril 1969.

SUMMARY

EFFECT OF MINERAL NUTRITION ON WATER BEHAVIOUR OF THE PLANT

The development of water uptake and transpiration has been followed in plants transferred from complete nutrient solution to pure water or to solutions lacking certain elements (N, P or K).

The comparison of plants receiving normal mineral nutrition and those lacking certain elements has led to the following observations :

— The opening of the stomata under the action of light and the transpiration during the first phase are very little affected by mineral nutrition (slight drop in nitrogen deficiency, slight increase in potassium deficiency),

— under the same conditions, water absorption is considerably slowed down by an absence of all nutrients or simply an absence of nitrogen ; the water deficiency arising in a plant starting to transpire is notably increased by such lack of minerals but the hydropassive regulation of the stomata does not take place quicker.

On the contrary, the absorption/transpiration equilibrium after the stomata have reacted is effected with greater difficulty. Then the transpiration flow settles to a lower level.

— The Deficiency of potash or phosphate had no notable effect on passive absorption over the period of our observation.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG DER MINERALISCHEN ERNÄHRUNG
AUF DAS WASSERVERHALTEN DER PFLANZE

Die Entwicklung der wasserabsorption und der Ausdünstung wurde bei Pflanzen, die aus einer kompletten Nährlösung in permutiertes Wasser oder in an verschiedenen Elementen (N, P, oder K) mangelnden Nährlösungen versetzt wurden, untersucht.

Der Vergleich der Messungen, die an mineralisch normal versorgten Pflanzen und an Pflanzen, die einer Mangelernährung unterworfen wurden, ergab die nachstehenden Feststellungen :

— die Öffnung der Poren unter der Wirkung des Lichtes und die dadurch erfolgende Ausdünstung im Laufe dieser ersten Phase Werden durch die Bedingungen der mineralischen Ernährung sehr wenig gestört (unbedeutende Verminderung des Stickstoffmangels, geringe Zunahme des Kalimangels) ;

— unter denselben Bedingungen wird die wasserabsorption durch einen gesamten Mangel bzw. einen blossen Stickstoffmangel stark verlangsamt. Das bei Beginn der Ausdünstung in der Pflanze sich einstellende wasserdefizit wird durch diese Mängel beträchtlich erhöht. Die hydropassive Porenregulierung jedoch offenbart sich nicht rascher.

Dagegen stellt sich der Wiederausgleich « Absorption-Ausdünstung » nach der Porenregulierung viel schwerer ein. Die bei Gleichgewicht wirkende Ausdünstung stabilisiert sich auf einem niedrigeren Niveau.

— in der in Betracht genommenen Zeitspanne wirken die Kali-oder Phosphormängel nicht wesentlich auf diese passive Absorption ein.

РЕЗЮМЕ

Влияние минерального питания на поведение растения в отношении влаги.

М. МИНЬКО.

Автор проследил эволюцию поглощения влаги и транспирации у растений перенесенных с полной питательной смеси на деминерализованную воду или на питательные смеси в которых отсутсвовал один из главных питательных элэментов (N, P, или K).

Измерения проведенные на растениях получавших нормальное минеральное питание, или находившихся под влиянием недостатка одного из элементов дали результаты, в свете которых автор выводит следующие заключения :

— Открытие устьиц под влиянием освещения и транспирация связанная с этой первой фазой, мало нарушаются условиями минерального питания (легкое подавление в отсутствии азота, слабая стимуляция в отсутствии калия).

— В тех-же условиях поглощение влаги сильно замедляется в отсутствии всех элементов или при недостатке одного только азота; водный дефицит устанавливающийся в растении с начала транспирации сильно возрастает от этих недостатков, но гидро-пассивное регулирование устьиц не происходит от этого быстрее.

Напротив, достижение нового равновесия между поглощением и транспирацией после регулировки устьиц, — более трудно и уравновешенное транспирационное течение стабилизуется на уровне более низком.

— Недостаток калия или фосфора не имеет сильного влияния на это пассивное поглощение в масштабе времени данного опыта.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARLAND A., 1952. Die transpirations intensität der pflanzen als gründbage bei der ermittlung optimaler acker und pflanzenbaulicher kulturmaf nahmen-Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch naturwissenschaftliche Klasse. 44, Berlin, Akademie Verlag.

BASTIN R., 1967. — *Traité de Physiologie végétale.*

BINET P., BRUNEL J.-P., 1967. *Physiologie végétale.*

CHARTIER Ph., HALLAIRE M., 1967. Photosynthèse de la feuille et du couvert végétal : influence particulière de l'alimentation hydrique. Czechoslovak National Comit of the International Commission on Irrigation and drainage determination. *Soil Water Symp.*

DREW D. H., 1967. Mineral nutrition and the water relation of plants. I. A comparison of the effects of mineral free water and nutrient solution on water uptake and transpiration. *Plant and Soil*, **26**, 158-174 II. Some relationships between mineral nutrition, root function and transpiration rate. *Plant and Soil*, **26**, 469-480.

EHRLER W. L., Van BAVEL C. H. M., NAKAYAMA F. S., 1966. Transpiration, water absorption and internal water balance of cotton plants as affected by light and changes in saturation deficit. *Plant Physiol.*, **41**, 71-74.

FREY-WISSLING A., 1935. *Die Stoffanscheidung der höheren Pflanzen*. Berlin Springer.

GAASTRA P., 1959. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbondioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbouwhogesch.* Wageningen, **59**, 13, 1-68.

JANES B. E., 1961. Use of polyethylene glycol as a solvent of nutrient solution in studies on the physiology of water in plants. *Plant Physiol.*, **36** (Suppl.).

KRAMER P. J., 1937. The relation between rate of transpiration and rate of absorption of water in plants. *Amer. J. Bot.*, **24**, 10-15.

MAC DOWALL F. D. H., 1964. Reversible effects of chemical treatments on the rhythmic exudation of sap by tobacco roots. *Canad. J. Bot.*, **42**, 115-122.

MIKHAELIS Z., 1964. Transpiration du blé de printemps aux divers stades de développement en fonction de la nutrition azotée et potassique. *Fiz. Rast.*, **4**, 649-653.

OKAMOTO S., 1963. Diurnal periodicity in contents of nitrogenous constituents of bleedings sap from Taro plants in relation to potassium nutrition. *Soil Sci. Plant Nutrit.*, **9**, 3, 8-13.

OKAMOTO S., 1966. Diurnal periodicity in contents of amino Nitrogen of bleeding from Taro plants as affected by potassium and nitrogen. *Soil Sci. Plant Nutrit.*, **12**, 139-143.

PARCEVAUX S. de, 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs de milieu. *L'eau et la production végétale*, 63-160, I. N. R. A., Paris.

RALEIGH G. J., 1946. The effect of various ions on guttation of the tomato. *Plant Physiol.*, **21**, 194-200.

ROBELIN M., 1962. Rapports entre augmentation de poids sec et transpiration en condition de sécheresse. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 718-720.

RUF R. H. et *al.*, 1967. Components of osmotic adjustement of plants to rapid changes in root medium osmotic pressure. *Soil Sci.*, **104**, 159-162.

SPEIDEL B., 1935. Untersuchungen zur Physiologie des Blutens bei höheren Pflanzen. *Planta*, **30**, 67, 112.

Ann. agron., 1969, **20** (3), 277-303.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE MILIEU SUR LA RÉPARTITION DE L'AZOTE DANS LE SOL

III. — Acides aminés et conditions d'aération [1]

J. DECAU
avec la collaboration technique de B. Pujol

Station d'Agronomie et d'Œnologie, 67, boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Étude expérimentale de l'influence des conditions d'aération sur la répartition des acides aminés libres de paille, de sol additionné de paille ou de glucose et de sol seul mis en incubation. A partir des résultats obtenus, ont été analysées les relations entre la répartition des acides aminés des milieux incubés et celle des horizons de sol.

I. — INTRODUCTION

Grâce à l'analyse d'un nombre important de sols arables et de profils, nous avons pu montrer qu'il existe diverses relations entre la répartition des acides aminés extraits par hydrolyse et les conditions de milieu dans lesquelles évoluent ces composés (Decau, 1969). Nous avons mis en évidence plusieurs mécanismes par lesquels interviennent certaines de ces conditions (climat, nature du sol, fumure). En revanche, nous n'avons pas envisagé jusqu'ici le mode d'action de l'une d'elles, l'aération du milieu. Nous nous proposons, dans ce mémoire, d'exposer les développements de nos travaux sur ce sujet.

[1] Le présent mémoire résume le dernier chapitre d'une thèse de doctorat ès Sciences naturelles qui a été soutenue en 1967 à l'Université de Clermont-Ferrand (n° E 74). Il fait suite à deux études (Decau, 1968, 1969) dans lesquelles sont groupés les principaux résultats exposés dans les précédents chapitres de ce travail de thèse.

La dépendance de la répartition des acides aminés à l'égard des conditions d'aération est suggérée par deux observations parallèles relatives aux profils, observations que nous rappellerons ici :

1. Il existe des gradients importants des proportions de divers acides aminés en fonction de la profondeur, gradients qui sont en partie indépendants des variations des proportions relatives de matière organique libre ou liée et des principaux autres facteurs pédoclimatiques. Ces gradients sont surtout importants dans les sols à pseudogley.

2. L'aération et le taux d'oxygène du sol diminuent vers la profondeur. Cette diminution est évidente dans certains milieux étudiés dans lesquels se forme, en profondeur, un pseudogley. Elle est souvent probable aussi, malgré l'absence de signes visibles d'anaérobiose, dans les autres types de profils (WIEGAN et LEMON, 1958).

Mais cette double observation ne permet pas de prouver, ni *a fortiori* de mesurer, l'influence du facteur aération sur la répartition des acides aminés du sol.

Nous avons essayé d'apporter ici quelques éléments de réponse aux questions que notre précédente étude a posées. Dans ce but, afin d'essayer de préciser les mécanismes de différenciation des acides aminés des sols en fonction des conditions d'aération, plusieurs incubations expérimentales, aérobies ou anaérobies, de paille ou de sol additionné ou non de paille ou de glucose ont été réalisées, au cours desquelles ont été déterminées les variations des acides aminés libres.

Nous avons choisi d'étudier cette fraction de l'azote aminé des pailles et des sols en incubation en raison de sa mobilité, de sa variabilité (DADD, FOWDEN et PEARSALL, 1953 ; PAUL et SCHMIDT, 1961 ; SWIETOCHOWSKI et MIKLAZEWSKI, 1964), qui s'oppose à la stabilité des acides aminés totaux des mêmes substrats en fermentation (BREMNER, 1955 ; JACQUIN, 1960) mais aussi et surtout, en raison de sa situation au carrefour du métabolisme de l'azote et donc de sa participation certaine — au moins partielle — à l'édification de la fraction azotée de l'humus.

II. — MILIEUX ÉTUDIÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

A. — *Milieux étudiés ; conditions d'incubation*

Quatre milieux ont été comparés (sol + paille, sol + glucose, sol seul et paille seule), incubés, d'une part en aérobiose, d'autre part en anaérobiose.

1. *Aérobiose.*

Des lots de 25 g de paille de blé finement broyée sont placés dans des cristallisoirs de matière plastique de 300 ml puis humectés avec 75 ml d'une solution d'un sel d'ammonium contenant 250 mg d'azote.

Des lots de 100 g de terre tamisée à 2 mm, après mélange éventuel avec 2 g de paille ou de glucose, ont été placés dans des cristallisoirs puis humectés jusqu'à pF 3,1 par addition de 18 ml d'eau dans les sols sans paille, de 24 ml dans les sols avec paille.

Le sol utilisé est une argile limono-sableuse calcaire très pauvre en matière organique (0,7 p. 100).

Chaque lot de terre enrichi ou non en matière organique a reçu, sous forme de carbonate d'ammonium, 20 mg d'azote.

2. *Anaérobiose.*

Plusieurs échantillons de 60 g de paille broyée ont été placés dans des fioles coniques de 750 ml munies d'un bouchon de caoutchouc percé d'un trou dans lequel passe un tube à boules renfermant de l'eau. Chaque lot de paille a reçu 300 ml d'eau.

Des échantillons de 100 g de la terre utilisée précédemment ont été également placés dans des fioles coniques munies du même dispositif ; certains ont été additionnés de 2 g de paille ou de glucose. En l'absence de paille, la terre a reçu 60 ml d'eau, avec paille, 70 ml.

Les apports d'azote ont été dans chaque cas les mêmes que dans les milieux aérobies correspondants.

L'air contenu dans les diverses fioles coniques a été chassé et remplacé par du gaz carbonique.

Les cristallisoirs et les fioles ont été placés en étuve bactériologique à 30°C pendant 4 ou 16 jours.

Des prélèvements ont été réalisés avant fermentation puis après incubation, pour déterminer les acides aminés libres et, dans quelques cas, l'acidité et l'état d'oxydo-réduction ainsi que les formes minérales de l'azote.

B. — *Techniques analytiques*

1. *Détermination des acides aminés libres*

a) *Extraction et dosage.*

Des poids de paille humide en incubation, correspondant à 4 g de paille sèche, et des lots de 100 g de terre additionnée ou non de substrat organique sont prélevés, sur lesquels les acides aminés libres sont extraits avec de l'alcool à 80 p. 100 par ébullition à reflux. Les solutions alcooliques sont ensuite concentrées sous vide, puis placées au contact des résines Dowex 50 × 4 sous forme H précédemment employées (DECAU, 1969).

Après lavage puis élution, la quantité d'acides aminés libres extraite est évaluée par une technique d'estimation colorimétrique globale (DECAU, 1969) puis, dans une partie aliquote de chaque éluat, les acides aminés sont séparés par électro-rhéophorèse suivant la méthode de BISERTE et *al.* (1960).

Les électro-rhéophorégrammes sont révélés ensuite par la technique précédemment décrite (DECAU, 1968) puis l'importance des taches mesurées par comparaison avec les taches de solutions étalons développées dans des conditions identiques.

b) *Expression des résultats.*

La technique de BISERTE et *al.* (1960) a permis de séparer et de déterminer les acides aminés et les groupes d'acides aminés suivants : acide aspartique, acide glutamique, sérine + glycocolle, thréonine, alanine, proline, tyrosine, valine, phénylalanine + leucine + isoleucine, acide β amino-isobutyrique, β alanine, acide γ amino-butyrique, acide δ aminovalérique et acides aminés basiques.

Après détermination des cofficients d'extinction molaire des acides arrivés isolés et des coefficients moyens correspondants des acides aminés demeurant groupés, on a pu exprimer les résultats en proportions molaires d'acides aminés p. 100 de la somme des acides aminés dosés.

Par ces analyses, chaque milieu s'est donc trouvé caractérisé par les valeurs simultanées des 14 paramètres que sont les proportions molaires d'acides aminés. Afin de réaliser une comparaison d'ensemble des systèmes multivariables ainsi obtenus, nous avons fait appel à la méthode de mesure des distances généralisées de KENDALL et STUART (1966), méthode que nous avons précédemment employée (DECAU, 1968, 1969) et qui permet d'établir aisément et de façon globale les différences et les rapprochements entre les divers milieux étudiés.

2. *Déterminations complémentaires*

Au cours de l'essai, nous avons précisé, dans les incubations de sol, les conditions d'acidité et d'oxydo-réduction et, dans les incubations de paille seule, l'acidité et les teneurs en azote minéral.

Le pH a été mesuré sur un prélèvement de 2 g de paille ou de 10 g de terre, après addition de 25 ml d'eau, au moyen d'un pH-mètre à électrode de verre.

Les conditions oxydoréductrices ont été estimées par le test de JACKSON (1964).

L'azote ammoniacal échangeable a été déterminé à partir de l'extrait obtenu par agitation d'un poids de paille au contact d'une solution de sulfate de potassium N/2, par colorimétrie après combinaison des ions ammonium avec le phénate-hypochlorite (CHARLOT, 1961).

L'azote nitrique a été extrait au moyen d'une solution saturée de sulfate de calcium et dosé, soit par la méthode à l'acide phénol-disulfonique (CHARLOT, 1961), soit par la méthode DEWARDA.

III. — RÉSULTATS

Les incubations expérimentales dont nous venons de décrire les conditions ont fait l'objet, suivant les cas, de 2 ou de 4 essais successifs. Dans les premières expériences, les acides aminés libres isolés ont été déterminés suivant des techniques

semi-quantitatives. Dans les dernières, en revanche, les principaux acides aminés ont fait l'objet d'études quantitatives. Les divers essais successifs ont fourni des résultats concordants ; nous indiquerons donc ici seulement les résultats obtenus lors de la dernière étude.

Nous envisagerons tout d'abord, de façon globale, la répartition des acides aminés libres, puis celle de l'azote minéral ; nous indiquerons ensuite les fluctuations des principaux acides aminés.

A. — *Variations de la somme des acides aminés libres*

Les acides aminés libres présentent des variations globales peu différentes, au cours des premiers jours d'incubation, quels que soient le substrat fermentant et les conditions expérimentales. On observe en effet (tabl. 1) une diminution générale, quoique variable, du taux des acides aminés libres après 4 jours d'incubation.

Par la suite s'amorce une différenciation très nette des milieux aérobies ou anaérobies. Celle-ci apparaît notamment quand on compare les teneurs globales en acides aminés libres des sols, additionnés ou non de paille ou de glucose, après 4 et après 16 jours d'incubation. Dans les milieux aérés, la teneur en acides aminés libres décroît entre le quatrième et le seizième jour ; elle augmente, en revanche, dans les milieux anaérobies.

TABLEAU I

Variations de la teneur globale des milieux en acides aminés libres au cours de l'incubation
(Nombre de micromoles d'acides aminés dans 100 g de sol ou dans 2 g de paille)

	Sans incubation	Après incubation		
		Conditions d'incubation	Durée d'incubation	
			4 j	16 j
Sol + paille	9,48	Aérobiose	1,62	1,34
		Anaérobiose	0,80	1,08
Sol + glucose	1,98	Aérobiose	1,92	1,77
		Anaérobiose	1,94	4,68
Sol	2,21	Aérobiose	1,18	0,80
		Anaérobiose	0,45	0,81
Paille	24,25	Aérobiose	5,27	2,83
		Anaérobiose	21,16	11,61

Nous avons déjà observé une telle différence d'évolution du taux d'acides aminés libres en fonction des conditions d'aération, lors de précédentes études d'incubation de paille (DECAU, 1962) : tandis qu'en milieu aéré, le taux d'acides aminés libres ne cesse de décroître jusqu'à atteindre un taux très faible, en l'absence d'air, la teneur en acides aminés libres décroît tout d'abord, passe par un minimum après 8 jours environ d'incubation, pour augmenter ensuite.

Les résultats du tableau 1 confirment donc que l'évolution du taux d'acides aminés libres est différente, en aérobiose d'une part, en anaérobiose d'autre part, et montrent en outre que cette évolution est assez comparable dans les substrats incubés en présence ou en l'absence de sol.

B. — *Variations des formes minérales de l'azote*

Les nitrates n'étant présents dans nos fermentations de paille qu'à l'état de traces, ce qui vient confirmer les observations de BREMNER (1955), l'azote minéral se trouve presque en totalité sous forme ammoniacale.

Les teneurs en azote ammoniacal varient de façon très différente suivant les conditions d'aération des milieux, comme le montrent les données du tableau 2.

TABLEAU 2

Variations de la teneur en azote ammoniacal des pailles en incubation (p. 1 000 de matière sèche)

Conditions d'incubation	Durée d'incubation (j)					
	0	2	4	8	11	29
Aérobiose	10,00	1,52	0,37	0,06	0,03	0,01
Anaérobiose	10,00	3,03	4,52	5,99	5,45	5,20

Tandis qu'en aérobiose, la teneur en azote ammoniacal diminue très vite et demeure à un faible niveau, en milieu non aéré, la diminution est moins importante et une augmentation subséquente ramène la teneur en ions ammonium à 50 p. 100 de sa valeur initiale.

Cette évolution différente de l'azote ammoniacal suivant les conditions de milieu rappelle celle des acides aminés libres mais il convient, avant de rapprocher les deux faits, de préciser la nature des composés qui participent à la variation globale de l'azote aminé.

C. — *Variations particulières des principaux acides aminés*

Les résultats obtenus au cours de l'étude des acides aminés libres ont été exprimés sous forme de pourcentages molaires de la somme des acides aminés dosés. Ces résultats sont groupés dans le tableau 3.

Plusieurs faits ressortent de ces données :

— tout d'abord l'apparition, du fait de l'incubation, d'acides aminés nouveaux, l'acide β-aminoisobutyrique et l'acide δ-aminovalérique. Ces acides aminés apparaissent dans la plupart des milieux, mais ils sont plus abondants en anaérobiose qu'en aérobiose, après 16 jours d'incubation qu'après 4 jours.

— ensuite, et ceci n'est qu'une extension des observations précédentes, la variation très générale des autres acides aminés, variation qui affecte particulièrement

TABLEAU 3

Variations des proportions molaires des principaux acides aminés

Milieux étudiés (1)	Incubation (jours)	Asp	Glu	Ser + Gly	Thr	Ala	Pro	Tyr	Val	Phe + Leu + Ile	βAIB	βAla	γABu	δAVl	Ac. am. basiques
SP	0	0,5	2,8	11,6	4,1	23,0	7,6	4,8	15,8	27,4	0	0,3	2,1	0	tr
SP AE	4	3,2	5,1	25,9	6,6	20,4	5,4	3,3	10,2	14,0	0	1,7	1,2	0	3,0
SP AE	16	1,8	7,2	21,2	4,5	15,8	6,8	5,2	12,9	18,2	0,7	1,5	2,2	0	2,0
SP AN	4	5,5	2,8	21,2	1,9	18,6	10,0	9,3	11,0	11,0	0,8	5,3	0,6	0	2,0
SP AN	16	5,1	5,8	28,8	5,9	14,1	5,4	6,4	7,0	5,7	1,0	3,7	2,1	1,8	7,2
SG	0	0,9	1,7	15,3	2,5	32,1	5,5	2,4	10,5	17,5	0	1,7	1,0	0	8,9
SG AE	4	1,7	9,7	23,5	2,5	23,4	11,9	1,2	8,2	9,1	0,6	1,5	1,2	0,2	5,3
SG AE	16	2,4	9,5	25,8	9,6	16,4	5,8	5,1	8,4	8,2	0,8	2,3	1,0	0,5	4,2
SG AN	4	1,8	2,2	15,1	7,2	33,1	8,8	10,5	9,3	5,4	1,0	1,8	0,5	0,5	2,8
SG AN	16	1,0	1,0	11,3	3,5	6,5	2,4	0	8,4	1,4	2,8	3,7	3,6	53,4	1,0
P	0	5,8	16,7	15,0	3,1	18,1	4,4	3,2	7,2	11,3	0	0,1	5,6	0	9,5
P AE.....	4	7,2	31,0	14,3	6,6	11,3	1,7	3,2	3,8	4,7	0	1,0	0,9	0,9	11,6
P AE.....	16	7,5	39,3	17,2	3,9	7,5	0,4	1,9	4,1	4,7	0	2,0	1,6	1,4	7,7
P AN	4	1,5	4,1	11,4	0	50,7	3,8	2,1	3,3	2,4	0,2	1,0	2,3	16,2	2,2
P AN	16	1,4	4,7	7,5	2,2	6,8	2,1	2,6	5,0	2,3	2,1	5,2	4,6	47,6	7,1
S	0	1,5	3,3	15,5	3,4	22,5	4,5	3,7	16,5	27,1	0	0,6	1,1	0	0,3
S AE	4	4,3	6,1	35,0	7,3	16,0	5,7	1,3	6,1	8,7	0	0,7	0,4	0	8,4
S AE	16	4,6	2,5	42,9	8,9	10,0	5,1	1,4	4,7	7,5	0	3,0	1,2	1,9	6.3
S AN	4	5,8	3,1	29,6	6,9	13,9	9,0	2,9	7,2	10,9	0	4,9	1,8	0	3,5
S AN	16	3,2	1,8	35,0	6,0	16,0	7,8	4,0	8,7	8,3	0	2,3	2,3	0,2	4,4

(1) SP : sol + paille ; SG : sol + glucose ; P : paille ; S : sol ; AE : aérobiose ; AN : anaérobiose.

l'acide glutamique (dans les pailles incubées en aérobiose notamment), certains acides aminés neutres aliphatiques (sérine + glycocolle, alanine, phénylalanine, leucine et isoleucine principalement) et, dans une plus faible mesure, la β-alanine, l'acide γ-aminobutyrique et les acides aminés basiques.

Ces variations multiples résultent de l'influence des conditions de milieu (conditions d'aération au cours de l'incubation, mais aussi durée d'incubation et nature des milieux incubés) sur le métabolisme des acides aminés libres.

Du fait du nombre important des variations simultanément obtenues, variations que déterminent les trois facteurs ci-dessus, l'exploitation directe des données s'avère nécessairement difficile. L'application d'une méthode de mesure des « distances » entre les milieux, méthode qui permet d'intégrer en une variation unique les multiples écarts particuliers des acides aminés, est donc nécessaire. Comme il a été indiqué plus haut (cf. techniques), nous avons fait appel dans ce but à la méthode de mesure des distances généralisées de KENDALL et STUART (1966), utilisée dans nos précédents mémoires (DECAU, 1968, 1969).

La distribution des acides aminés étant simultanément sous l'influence des conditions d'aération, de la durée d'incubation et de la nature des substrats, nous avons successivement essayé de dégager, dans cette expérience factorielle complexe :

1. l'influence propre à chaque facteur,
2. l'influence combinée des facteurs deux à deux,
3. l'influence cumulée des 3 facteurs.

Pour cela, dans les deux premières étapes de notre analyse, les milieux ont été tout d'abord répartis en groupes entre lesquels diffèrent seulement un ou deux des facteurs considérés. Dans chaque groupe, la répartition moyenne des acides aminés a été calculée puis, comme dans les travaux précédents (DECAU, 1968, 1969), les distances des divers milieux à la moyenne de leur groupe ont été déterminées et comparées statistiquement aux distances de ces mêmes milieux à la moyenne des autres groupes. En même temps, ont été calculées les distances entre les moyennes des groupes.

Dans la troisième étape de notre analyse, chaque milieu a été considéré isolément, dans ses rapports avec les autres milieux considérés de même, et les parentés et différences mises en évidence par la mesure des distances inter-milieux et par la recherche subséquente des constellations (technique de RAO (1952) et de VAN DEN DRIESSCHE (1965)).

Les composantes élémentaires des principales distances ont été étudiées et ainsi les écarts propres à chaque acide aminé ont pu être précisés.

1. *Influence générale de chaque facteur.*

Les résultats obtenus dans cette étude sont résumés et représentés schématiquement sur la figure 1.

Les données de la figure 1 A montrent que les milieux non incubés, les milieux incubés en aérobiose et les milieux incubés en anaérobiose, forment des groupes statistiquement distincts les uns des autres, mais on note aussi que les milieux aérobies et les milieux anaérobies sont moins éloignés les uns des autres que des milieux initiaux.

Il s'ensuit que l'évolution des acides aminés libres, lors de l'incubation, comporte

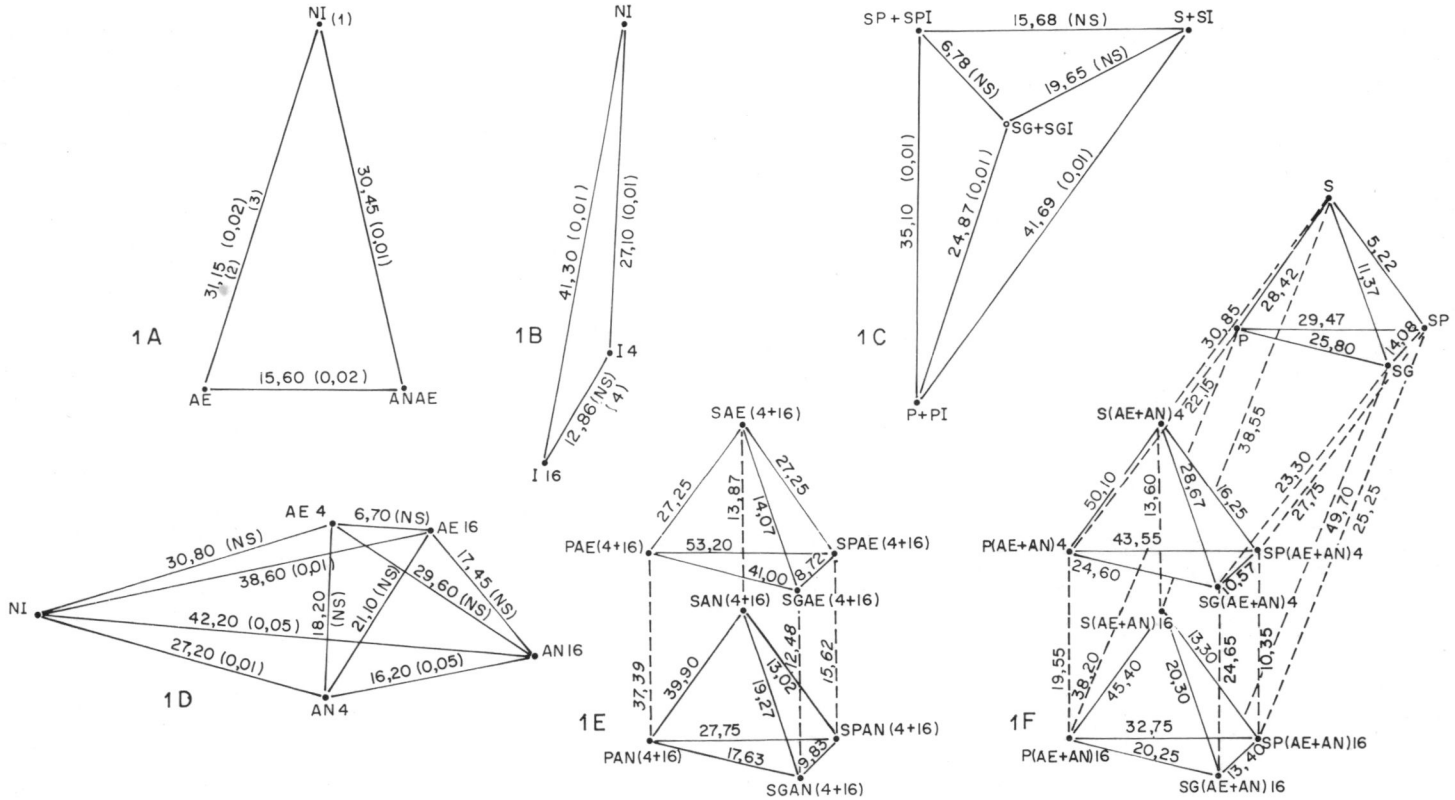


FIG. 1. — *Distances de* KENDALL *et* STUART *entre les milieux formés des mêmes substrats ou soumis à des conditions ou des durées d'incubation identiques*

(1) Signification des sigles :
NI : milieux non incubés ; AE : milieux incubés en aérobiose ; ANAE : milieux incubés en anaérobiose ;
I 4 : milieux incubés 4 jours ; I 16 : milieux incubés 16 jours ; P + PI : pailles initiales et incubées ;
SP + SPI : sols + pailles non incubés et incubés ; ..... ; AE4 : milieux incubés en aérobie pendant 4 jours ;
SAE (4+ 16) : sols seuls incubés en aérobiose ; S (AE + AN) 4 : sols seuls incubés pendant 4 jours.
SG + SGI : sols + glucose non incubés et incubés
(2) Distance intergroupes.
(3) Seuil de probabilité.
(4) N. S. distance non significative.

des processus communs en aérobiose et en anaérobiose ainsi que des processus différents.

L'analyse des composantes des distances inter-groupes met en effet en évidence principalement la diminution commune, sous l'effet de l'incubation, des proportions relatives du groupe des acides aminés à longue chaîne (phénylalanine, leucine et isoleucine) et l'apparition de l'acide β-aminoisobutyrique et de l'acide δ-aminovalérique. Elle permet aussi d'observer les variations différentes des taux d'acide glutamique, de thréonine et de β-alanine.

De même, l'examen de la figure I B permet d'observer l'éloignement grandissant des milieux incubés avec la durée d'incubation ($D_{NI-I(16)}$ (41,30) > $D_{NI-I(4)}$ (27.10)) mais aussi l'absence d'écart significatif entre les milieux incubés durant 4 jours et ceux qui l'ont été durant 16 jours.

De même, la figure I C montre que, parmi les 4 ensembles de milieux incubés, un seulement (la paille seule), très éloigné des autres milieux, en diffère significativement, et les données du tableau 3 montrent que les écarts résident principalement dans les taux plus élevés d'acide glutamique et d'acides aminés basiques et plus faibles d'acides aminés neutres : proline, valine, phénylalanine, leucine et isoleucine notamment. Mais l'éloignement des milieux renfermant seulement de la paille par rapport aux autres milieux est inégal : le sol additionné de glucose, le sol additionné de paille et le sol sans apport, se classent successivement par ordre croissant d'éloignement par rapport aux milieux à base de paille seulement.

2. *Influence combinée des facteurs deux à deux.*

Les résultats de l'étude de l'action combinée des facteurs aération, durée d'incubation, nature du substrat, considérés deux à deux, sont groupés, sur les figures I D, I E et I F.

En examinant tout d'abord la figure I D, nous pouvons faire les observations suivantes :

— en aérobiose, avec le temps d'incubation, augmente l'éloignement moyen des milieux incubés, par rapport à la moyenne des milieux initiaux. Mais les différents milieux se répartissent autour de leurs moyennes d'une manière telle que ces écarts ne sont pas significatifs ;

— en anaérobiose, la distance qui sépare la moyenne des milieux incubés de la moyenne des milieux initiaux croît, comme en aérobiose, avec le temps d'incubation. Mais ici les milieux demeurent suffisamment groupés autour de leurs moyennes pour différer statistiquement entre eux. Il semble donc que l'empreinte donnée par l'anaérobiose à la répartition des acides aminés libres l'emporte sur celle donnée par la durée d'incubation et par la nature du substrat incubé, alors qu'il n'en est pas ainsi en aérobiose.

L'étude de l'action combinée des conditions d'aération et de la nature du substrat nous a conduit (fig. I E) à grouper deux à deux les milieux incubés. A partir de tels groupes, par suite du nombre trop faible des composants, la recherche du seuil de signification des distances inter-groupes devient illusoire. Nous avons donc abandonné ici ce mode d'analyse des résultats et comparé seulement les distances entre milieux différemment incubés aux distances entre milieux de nature différente.

Nous voyons (fig. I E) que ce sont les milieux « paille seule » qui présentent la

distance la plus grande entre milieux incubés en aérobiose et milieux incubés en anaérobiose. ($D_{PAE\ (4+16)} - PAN\ (4+16) = 37.39$). Cette distance est supérieure à 3 des 6 distances qui séparent PAE (4 + 16) et PAN (4 + 16) des milieux renfermant du sol. Autrement dit, l'influence des conditions d'aération, pour les pailles en incubation, est sensiblement de même importance que celle de la nature du milieu (présence ou absence de sol).

Dans tous les autres milieux, par contre, la distance entre substrats aérobies et substrats anaérobies est généralement plus faible que celle qui sépare les milieux de nature différente. Ainsi par exemple, la distance SAE (4 + 16) — SAN (4 + 16) est plus faible que 5 des 6 distances qui séparent ces groupes des milieux de nature différente. L'influence des conditions d'incubation cède donc ici le pas à celle de la nature du milieu incubé.

L'étude de l'influence des facteurs durée d'incubation et nature des substrats, conduit à des résultats similaires (fig. I F). Les pailles incubées occupent ici, comme sur la figure I E, une position singulière : les distances qui séparent les pailles, aux divers stades d'incubation, des milieux renfermant du sol sont toutes supérieures à celles qui séparent les divers groupes de pailles incubées pendant des temps différents alors qu'il n'en est ainsi pour aucun autre milieu. En examinant les résultats obtenus pour les pailles incubées seules, nous voyons que les différences dues à la nature du milieu incubé (pailles d'une part, sols d'autre part) ont plus d'influence sur la répartition des acides aminés libres que la durée d'incubation.

Dans les autres milieux, l'influence de la nature du substrat et celle de la durée d'incubation sont en moyenne assez comparables ; mais elles sont variables suivant le milieu et suivant la période d'incubation considérés : 0 à 4 jours ; 4 à 16 jours. Nous voyons ainsi que la distance S — S (AE + AN)4 est inférieure à 5 des 6 distances séparant ces milieux des autres groupes au même stade d'incubation, alors que c'est l'inverse pour la distance S (AE + AN) 4 — S (AE + AN) 16.

En définitive, l'étude de l'influence générale de chaque facteur et celle de l'action simultanée des facteurs deux à deux met en lumière les principaux faits suivants relatifs à la répartition des acides aminés libres :

a) la parenté moyenne relative des milieux incubés, soit en aérobiose, soit en anaérobiose, qui s'oppose à leur éloignement des milieux non incubés ;

b) la faible influence moyenne de la deuxième période d'incubation (du 4e au 16e jour) comparée à leur commun éloignement des milieux incubés ;

c) la position particulière des milieux renfermant uniquement de la paille par rapport aux milieux sols ;

d) l'importance relative différente des facteurs aération, durée d'incubation, nature des milieux sur la distribution des acides aminés libres des substrats (fig. I D, I E, I F), selon les milieux incubés.

Ces différents résultats montrent en définitive que, sauf cas exceptionnel, la répartition des acides aminés libres n'est pas déterminée par un facteur unique ou même par un couple de facteurs. Il faut donc étudier, dans chaque milieu, l'action combinée des 3 facteurs.

3. *Influence combinée des 3 facteurs.*

Pour étudier cette influence, il faut considérer isolément chacun des milieux analysés, dont la répartition d'acides aminés libres intègre l'action des 3 facteurs,

TABLEAU 4

Distances de KENDALL *et* STUART *entre les différents milieux analysés*

De SP à		De SG à		De P à		De S à		De SPAE (4) à	
S	5,22	S	11,37	SG	25,80	SP	5,22	SAN (4)	6,89
SPAE (16)	11,45	SP	14,08	PAE (16)	26,30	SG	11,37	SAN (16)	9,13
SG	14,08	SPAE (4)	20,12	S	28,42	SPAE (16)	13,02	SGAE (16)	12,73
SPAE (4)	18,30	SPAE (16)	21,13	SPAE (16)	28,48	SPAE (4)	14,37	SPAE (16)	12,75
SGAE (4)	27,98	SGAE (4)	24,30	SP	29,67	SGAE (4)	26,30	S	14,37
SAN (16)	29,40	P	25,80	PAE (4)	30,25	SPAN (4)	27,40	SAE (4)	14,44
P	29,67	SPAN (4)	26,18	SPAE (4)	32,99	P	28,42	SP	18,30
SPAN (4)	30,85	SAE (4)	29,07	PAN (4)	33,40	SAN (16)	30,20	SGAE (4)	19,40
SGAN (4)	31,58	SAN (16)	29,66	SGAE (4)	33,62	SGAN (4)	30,90	SG	20,12
SAN (4)	32,62	SAN (4)	30,41	SAE (4)	37,28	SAN (4)	32,05	SGAN (4)	20,77
PAN (4)	39,25	SGAN (4)	32,75	SAN (16)	38,90	SGAE (16)	34,90	SPAN (16)	20,95
SGAE (16)	39,50	SGAE (16)	37,50	SPAN (16)	41,42	PAN (4)	35,72	SPAN (4)	21,00
SAE (4)	43,75	SPAN (16)	40,88	SAN (4)	44,03	SAE (4)	38,00	SAE (16)	25,33
SPAN (16)	45,70	PAN (4)	42,08	SGAE (16)	46,52	SPAN (16)	45,70	P	32,99
SGAN (16)	59,58	PAE (16)	50,20	PAN (16)	48,50	PAE (16)	50,59	PAN (4)	43,10
SAE (16	60,12	SAE (16)	51,22	SPAN (4)	49,29	SAE (16)	53,80	PAE (16)	44,66
PAE (16)	62,44	PAE (4)	53,41	SGAN (4)	50,74	SGAN (16)	55,33	PAE (4)	45,00
PAE (4)	68,22	PAN (16)	59,13	SAE (16)	57,77	PAE (4)	56,81	SGAN (16)	54,46
PAN (16)	69,45	SGAN (16)	59,70	SGAN (16)	59,00	PAN (16)	60,36	PAN (16)	60,34

De SPAE (16) à		De SPAN (4) à		De SPAN (16) à		De SGAE (4) à		De SGAE (16) à	
SP	11,45	SPAE (16)	16,20	SGAE (16)	6,17	SPAE (16)	16,14	SPAN (16)	6,17
SPAE (4)	12,45	SGAE (4)	17,39	SAN (16)	10,25	SGAE (16)	16,20	SGAN (4)	8,47
S	13,02	SAN (4)	18,04	SAN (4)	15,53	SPAN (4)	17,39	SAN (16)	11,65
SGAE (4)	16,14	SGAE (16)	18,70	SGAN (4)	18,51	SPAN (16)	18,81	SPAE (4)	12,73
SPAN (4)	16,20	SPAN (16)	20,35	SGAE (4)	18,81	SAN (16)	19,14	SAN (4)	13,40
SAN (16)	20,59	SGAN (4)	20,87	SAE (16)	19,35	SPAE (4)	19,40	SGAE (4)	16,20
SGAE (16)	20,77	SPAE (4)	21,00	SPAN (4)	20,35	SGAN (4)	22,25	SPAN (4)	18,70
SG	21,13	SAN (16)	22,67	SPAE (4)	20,95	SAE (4)	22,50	SPAE (16)	20,77
SAN (4)	21,96	SG	26,18	SPAE (16)	25,20	SAN (4)	24,03	SAE (16)	22,05
SPAN (16)	25,20	S	27,40	PAN (16)	28,96	SG	24,30	SAE (4)	23,62
SGAN (4)	27,95	SP	30,85	SAE (4)	31,41	S	26,30	S	34,90
P	28,48	SAE (4)	41,25	PAN (4)	31,61	PAN (4)	26,92	SG	37,50
SAE (4)	34,53	PAN (4)	45,38	PAE (16)	34,99	SP	27,98	PAN (4)	38,48
PAN (4)	39,48	SAE (4)	46,70	SGAN (16)	35,91	P	33,62	SP	39,50
SAE (16)	46,18	P	49,29	SG	40,88	SAE (16)	38,62	PAE (4)	42,43
PAN (16)	48,61	SGAN (16)	49,82	P	41,42	PAE (16)	40,40	PAE (16)	43,03
SGAN (16)	49,15	PAN (16)	50,37	PAE (4)	41,93	SGAN (16)	40,80	PAN (16)	44,68
PAE (16)	52,20	PAE (16)	56,08	SP	45,70	PAN (16)	44,26	P	46,52
PAE (4)	62,47	PAE (4)	71,23	S	45,70	PAE (4)	52,30	SGAN (16)	46,75

TABLEAU 4 *(suite)*

De SGAN (4) à		De SGAN (16) à		De PAE (4) à		De PAE (16) à		De PAN (4) à	
SGAE (16)	8,47	PAN (16)	12,62	PAE (16)	9,02	SPAE (4)	9,02	PAN (16)	20,10
SPAN (16)	18,51	PAN (4)	30,50	SAE (4)	29,35	PAN (16)	23,75	SGAE (4)	26,92
SPAE (4)	20,77	SPAN (16)	35,91	P	30,25	P	26,30	PAE (16)	29,00
SPAN (4)	20,87	SGAE (4)	40,80	SAE (16)	32,60	SAE (16)	27,90	SGAN (16)	30,50
SAN (16)	21,20	SAE (16)	41,90	PAN (4)	41,25	PAN (4)	29,00	SPAN (16)	31,61
SGAE (4)	22,25	PAE (16)	42,10	SPAN (16)	41,93	SPAN (16)	34,99	P	33,40
SAN (4)	25,30	SAN (16)	44,05	PAN (16)	42,30	SAE (4)	37,85	SGAN (4)	34,50
SPAE (16)	27,85	SGAE (16)	46,75	SGAE (16)	42,48	SGAE (4)	40,40	S	35,72
S	30,90	SGAN (4)	48,25	SPAE (4)	45,00	SGAN (16)	42,10	SAN (16)	38,30
SP	31,58	SPAE (16)	49,15	SGAN (4)	51,20	SGAE (16)	43,03	SGAE (16)	38,48
SG	32,75	SPAN (4)	49,82	SAN (4)	51,30	SAN (16)	44,25	SP	39,25
SAE (4)	34,15	SAN (4)	53,70	SAN (16)	51,30	SPAE (4)	44,66	SPAE (16)	39,48
PAN (4)	34,50	SPAE (4)	54,46	SGAE (4)	52,30	SAN (4)	45,80	PAE (4)	41,25
SAE (16)	39,60	S	55,33	SG	53,41	SG	50,20	SG	42,08
SGAN (16)	48,25	P	59,00	S	56,81	S	50,59	SPAE (4)	43,10
PAN (16)	49,00	SP	59,58	SGAN (16)	62,30	SPAE (16)	52,20	SAE (16)	43,65
P	50,74	SG	59,70	SPAE (16)	62,47	SPAN (4)	56,08	SPAN (4)	45,38
PAE (4)	51,20	PAE (4)	62,30	SP	68,22	SGAN (4)	57,00	SAE (4)	47,90
PAE (16)	57,00	SAE (4)	72,00	SPAN (4)	71,23	SP	62,44	SAN (4)	52,00

De PAN (16) à		De SAE (4) à		De SAE (16) à		De SAN (4) à		De SAN (16) à	
SGAN (16)	12,62	SPAE (4)	14,44	SAN (4)	17,40	SAN (16)	6,27	SAN (4)	6,27
PAN (4)	20,10	SAN (4)	18,75	SAN (16)	17,90	SPAE (4)	6,89	SPAE (4)	9,13
PAE (16)	23,75	SAE (16)	20,75	SPAN (16)	19,35	SGAE (16)	13,40	SPAN (16)	10,25
SPAN (16)	28,96	SGAE (4)	22,50	SAE (4)	20,75	SPAN (16)	15,53	SGAE (16)	11,65
SAE (16)	38,50	SGAE (16)	23,62	SGAE (16)	22,05	SAE (16)	17,40	SAE (16)	17,90
PAE (4)	42,30	SAN (16)	24,45	SPAE (4)	25,33	SPAN (4)	18,04	SGAE (4)	19,14
SGAE (4)	44,26	SG	29,07	PAE (16)	27,90	SAE (4)	18,75	SPAE (16)	20,59
SGAE (16)	44,68	PAE (4)	29,35	PAE (4)	32,60	SPAE (16)	21,96	SGAN (4)	21,20
SAN (16)	45,20	SPAN (16)	31,41	PAN (16)	38,50	SGAE (4)	24,03	SPAN (4)	22,67
P	48,50	SGAN (4)	34,15	SGAE (4)	38,62	SGAN (4)	25,30	SAE (4)	24,45
SPAE (16)	48,61	SPAE (16)	34,53	SGAN (4)	39,60	SG	30,41	SP	29,40
SGAN (4)	49,00	P	37,28	SGAN (16)	41,90	S	32,05	SG	29,66
SPAN (4)	50,47	PAE (16)	37,85	PAN (4)	43,65	SP	32,62	S	30,20
SAN (4)	55,30	S	38,00	SPAE (16)	46,18	P	44,03	PAN (4)	38,30
SG	59,13	SPAN (4)	41,25	SPAN (4)	46,70	PAE (16)	45,80	P	38,90
SPAE (4)	60,34	SP	43,75	SG	51,22	PAE (4)	51,30	SGAN (16)	44,05
S	60,36	PAN (4)	47,90	S	53,80	PAN (4)	52,00	PAE (16)	44,25
SAE (4)	67,50	PAN (16)	67,50	PAN (16)	57,77	SGAN (16)	53,70	PAN (16)	45,20
SP	69,45	SGAN (16)	72,00	SP	60,12	PAN (16)	55,30	PAE (4)	51,30

et chercher les rapports mutuels entre ces milieux. Dans ce but, nous avons employé ici encore la méthode de mesure des distances multivariables et calculé les 190 distances particulières qui séparent deux à deux les 20 milieux étudiés.

Les résultats ainsi obtenus (tabl. 4) montrent que les écarts qui séparent les divers milieux sont très variables et qu'il existe, entre les écarts extrêmes,

$$D_{min.} = D_{S - SP} = 5.22,\ D_{max.} = D_{SAE\ (4) - SGAN\ (16)} = 72.00$$

toute une gamme d'écarts intermédiaires, c'est-à-dire toute une gamme de similitude et de différences entre les milieux étudiés.

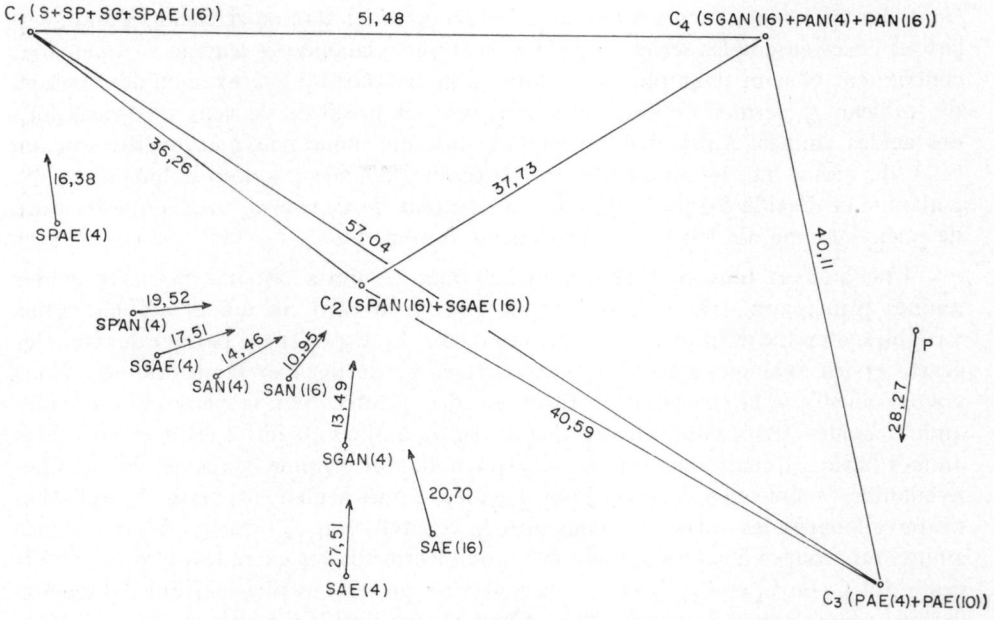


FIG. 2. — *Répartition des différents milieux analysés. Constellations et distances intergroupes*

La méthode de recherche des constellations de VAN DEN DRIESSCHE (1965) a permis d'étudier ces similitudes et ces différences et de montrer ainsi que, parmi les 20 milieux étudiés, 11 d'entre eux se groupent en 4 constellations, c'est-à-dire en 4 groupes dont les composants satisfont aux relations :

$$\begin{aligned} D^2 &\text{ intra-extra-constellation} > \overline{D}^2 \text{ intra-constellations} \\ \overline{D}^2 &\text{ interconstellations} > \overline{D}^2 \text{ intra-constellations} \end{aligned}$$

Les composants de ces constellations, les distances moyennes qui séparent ces groupes, la nature des principaux acides aminés responsables des écarts et la position, par rapport à ces constellations, des 9 milieux demeurant isolés, sont indiqués sur la figure 2.

Le sol additionné de paille (SP), le sol additionné de glucose (SG), le sol seul (S)

et le sol additionné de paille et incubé 16 jours en aérobiose (SPAE (16)) forment la première constellation (C_1). Le sol additionné de paille et incubé pendant 16 jours en anaérobiose (SPAN (16)) et le sol enrichi en glucose et incubé 16 jours en aérobiose (SGAE (16)) se groupent en une deuxième constellation (C_2). Les troisième et quatrième constellations sont respectivement constituées, l'une de la paille incubée 4 et 16 jours en aérobiose (C_3 = PAE (4) + PAE (16)), l'autre de la paille anaérobie incubée 4 et 16 jours et de l'ensemble sol + glucose incubé en anaérobiose durant 16 jours (C_4 = PAN (4) + PAN (16) + SGAN (16)).

Des distances relativement voisines séparent les constellations : l'éloignement le plus grand, qui sépare C_1 et C_3, atteint 57,04, le plus faible, entre C_1 et C_2, 36,26. Les acides aminés dosés participent diversement à la différenciation des constellations. La thréonine, l'acide β-amino-isobutyrique, la β-alanine et l'acide δ-aminovalérique et les ensembles sérine + glycocolle et phénylalanine + leucine + isoleucine, contribuent chacun pour plus de 4 unités à la distance C_1C_2. L'examen des données du tableau 3 permet de compléter l'analyse en précisant le sens des variations des acides aminés. Ainsi, dans l'exemple considéré, nous pouvons préciser que les taux de sérine et de glycocolle, de thréonine, d'acide β-amino-isobutyrique, de β-alanine et d'acide δ-aminovalérique augmentent de C_1 vers C_2 tandis que les taux de phénylalanine, de leucine et d'isoleucine diminuent.

Une analyse plus complète, associant aux résultats obtenus pour les acides aminés principaux, très variables, ceux que fournissent les acides aminés moins variables, étendue ensuite aux 6 distances reliant C_1, C_2, C_3 et C_4, permet de situer les écarts et les analogies entre les constellations et de dégager leurs origines. Nous voyons ainsi que la constellation C_1 diffère des 3 autres par sa pauvreté en acides aminés acides (Asp, Glu), en certains acides ω aminés (β-ala, δ-AVl) et en acides aminés basiques, mais aussi par sa richesse en alanine, proline, tyrosine, valine, phénylalanine, leucine et isoleucine. Pour 4 acides aminés seulement, cette constellation s'intercalle entre les autres. Au contraire, la constellation C_2 présente, pour 9 acides aminés ou groupes d'acides aminés, des taux intermédiaires entre les extrêmes observés, C_1 et C_3 ou C_1 et C_4. C_3 et C_4, au contraire, présentent plus souvent des teneurs limites, généralement opposées. Tel est le cas pour l'acide aspartique, l'acide glutamique, l'acide β-amino-isobutyrique, la β-alanine et l'acide γ-aminobutyrique.

Ces observations conduisent donc à situer les constellations C_1, C_3 et C_4 en 3 pôles entre lesquels vient s'insérer la constellation C_2. Entre ces pôles se situent, pour la plupart, les milieux demeurant isolés. Nous avons essayé de placer ces milieux sur la figure 2 en mentionnant seulement les distances les plus faibles qui les séparent des constellations. Nous voyons ainsi que l'un d'eux, SPAE (4), est surtout caractérisé par sa relative proximité de C_1, un autre, P, est surtout voisin de C_3 mais tous les autres, par contre, sont surtout « proches » de C_2.

Les données de la figure 2 nous montrent donc, en définitive, que les milieux incubés sont tous, à une exception près, éloignés des milieux non incubés (S, SG, SP et P). Mais ceux-ci ne forment pas un groupe unique, la nature du substrat principal, paille ou sol, ayant, dans certains cas, une influence déterminante sur la répartition des acides aminés libres et sur leur évolution sous l'effet des conditions et de la durée d'incubation. Tandis que dans les pailles incubées, l'influence de l'aération l'emporte visiblement sur celle de la durée d'incubation (groupement PAE (4) — PAE (16),

PAN (4) — PAN (16) en 2 constellations) il en va différemment pour les sols. Ainsi, par exemple, dans le sol ayant reçu du glucose, si les conditions d'aération assurent une différenciation nette des milieux incubés ($D_{SGAE\ (4)} - SGAN\ (4) = 22.25$; $D_{SGAE\ (16)} - SGAN\ (16) = 46.75$), la durée de fermentation n'entraîne pas une différenciation moindre ($D_{SGAE\ (4)} - SGAE\ (16) = 16.20$; $D_{SGAN\ (4)} - SGAN\ (16) = 48.25$).

Ainsi donc, la mesure des distances entre les milieux et la recherche des constellations permettent bien de faire apparaître les parentés et les divergences entre les milieux analysés ainsi que, dans un certain nombre de cas, leurs causes, mais une analyse plus approfondie des résultats est nécessaire pour comprendre les mécanismes de différenciations de la répartition des acides aminés libres des milieux étudiés.

IV. — DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les diverses analyses précédentes (analyse globale des acides aminés et de l'azote minéral, analyse particulière des principaux acides aminés) ont permis de mettre en évidence divers résultats intéressants (fluctuations de même sens du taux global d'acides aminés et de l'azote ammoniacal, fluctuations différentes des taux des différents acides aminés sous l'effet des facteurs étudiés) dont il convient maintenant de rechercher et d'analyser les causes et les mécanismes.

Ce travail d'analyse nous permettra ensuite, par la confrontation des données ci-dessus avec les résultats obtenus dans l'étude des acides aminés totaux des sols (Decau, 1969), de mieux cerner certaines causes de variations des proportions molaires des acides aminés des sols.

A. — *Relations entre les acides aminés libres et les formes minérales de l'azote*

Les variations de la somme des acides aminés libres et de l'azote minéral présentent, tant en aérobiose qu'en anaérobiose, de grandes similitudes. En milieu aéré, la diminution des acides aminés s'accompagne d'une décroissance aussi importante de l'azote ammoniacal, forme d'azote prépondérante dans les milieux étudiés.

En l'absence d'air, les teneurs en acides aminés libres et en ions ammonium passent l'une et l'autre par un minimum quelques jours après le début de l'incubation.

Il est probable qu'en aérobiose, dans un milieu riche en substrats énergétiques très fermentescibles, tel que la paille de blé, et dans lequel se manifestent d'intenses besoins d'azote, les acides aminés libres sont avant tout des fournisseurs d'azote pour les microorganismes et, utilisés comme tels, disparaissent du milieu presque au même rythme que l'azote minéral.

En anaérobiose, après une phase initiale d'organisation de l'azote, relativement comparable à celle des milieux aérobies, les phénomènes de minéralisation l'emportent un moment puis s'établit dans le milieu un taux élevé d'azote ammoniacal. En même temps s'accumulent, par suite de l'absence d'oxydant, les substrats carbonés simples et se trouvent ainsi réunis les matériaux qui, par des réactions anaérobies, peuvent conduire à une importante synthèse de certains acides aminés.

Ainsi donc, de leur utilisation possible comme source d'azote en milieu aérobie pauvre en azote minéral, de la synthèse de certains d'entre eux en présence d'azote ammoniacal et en conditions réductrices, résultent les similitudes notées entre les variations des acides aminés libres et celles de l'azote ammoniacal, dans les pailles en incubation.

Mais ce parallélisme, observé dans des conditions expérimentales particulières, ne paraît pas s'étendre aux autres phases du cycle de l'azote, comme le suggèrent les résultats de ROBERT (1964) : au cours de l'incubation aérobie d'un sol, en l'absence d'apport de matière organique, la minéralisation de l'azote l'emporte sur sa réorganisation mais, tandis que croît la teneur en azote minéral (principalement constitué ici d'azote nitrique), le taux d'acides aminés libres diminue ; cette diminution est la conséquence de la participation active, dans ces conditions, des acides aminés libres, aux réactions de minéralisation de l'azote et donc de leur contribution potentielle à l'alimentation azotée des plantes.

B. — *Causes de différenciation de la répartition des acides aminés libres*

Il ressort, de l'ensemble de nos résultats (tabl. 3 et fig. 1 et 2), que les écarts observés dans la répartition des acides aminés résultent de l'influence combinée des conditions d'aération, de la durée d'incubation et de la nature du substrat. Il s'ensuit qu'il est difficile d'étudier la part d'influence propre à chaque facteur. Cependant, nous avons vu, pour l'un des substrats, la paille, que l'un des facteurs, l'aération, joue un rôle déterminant dans la dynamique des acides aminés libres. Nous étudierons donc tout d'abord le rôle des conditions d'aération en considérant le cas des fermentations de paille. L'influence de la nature du substrat pourra être étudiée ensuite, en deux étapes successives. Nous pourrons tout d'abord étudier l'influence due à la présence de sol en comparant les incubations de paille seule et les incubations de paille ajoutée au sol ; nous pourrons ensuite préciser l'influence de la nature du substrat incorporé au sol en comparant sol + glucose, sol + paille et sol seul. Nous serons amené ici à indiquer le rôle du facteur temps dans les phénomènes.

1. *Différences dues aux conditions d'aération.*

Au cours des incubations, suivant qu'ils sont en aérobiose ou en anaérobiose, les acides aminés subissent une évolution différente.

En aérobiose, les acides aminés sont activement utilisés par les microorganismes pour leurs synthèses protoplasmiques et participent aussi probablement aux réactions de condensation avec les composés phénoliques libérés de la paille en cours d'incubation (FLAIG, 1964), pour former des matières humiques.

L'augmentation relative de l'acide glutamique peut être due à sa participation moins active à l'une et l'autre de ces réactions, mais il se peut aussi que cet acide aminé soit formé en plus grande quantité que tout autre dans ce milieu, du fait qu'il est le premier composé aminé synthétisé à partir du cycle tricarboxylique, cycle alimenté par l'oxydation des sucres et d'une partie des hémicelluloses et celluloses de la paille.

En anaérobiose, la chute initiale du taux d'acides aminés libres peut provenir,

soit de la prolifération d'organismes anaérobies qui utilisent les acides aminés libres pour la synthèse de leur propre matière, soit de la multiplication d'organismes aérobies utilisant aussi les acides aminés libres et se développant au début de l'incubation, tant que des conditions très réductrices ne se sont pas établies.

L'augmentation ultérieure du taux d'acides aminés pourrait être *a priori* attribuée à plusieurs causes : autolyse des tissus de la paille et des corps microbiens formés au cours de la phase initiale, absence de condensations d'acides aminés avec les composés phénoliques et, au cours d'une phase où le besoin d'azote est devenu faible, synthèse active d'acides aminés par les microorganismes suivant des voies préférentielles liées aux conditions du milieu.

La répartition des acides aminés trouvés aux différents stades de l'incubation anaérobie, dans la paille et dans le sol additionné de glucose notamment, met en lumière le rôle primordial de ce dernier processus. La répartition des acides aminés libres est en effet considérablement modifiée par l'apparition d'acide β-amino-isobutyrique, d'acide δ-aminovalérique et d'amines et par l'augmentation du taux d'alanine mais il est certain, par ailleurs, que l'accumulation relative de ces produits, si elle résulte en premier lieu de synthèses microbiennes, est vraisemblablement favorisée aussi par l'absence de condensation des acides aminés avec des composés phénoliques en l'absence d'oxygène (FLAIG, 1964).

Les plus importants des acides aminés formés sont ceux qui prennent naissance par des réactions n'exigeant pas la présence d'oxygène, à partir de produits eux-mêmes issus de réactions dans lesquelles celui-ci n'intervient pas non plus. Ainsi, l'alanine provient très probablement de l'acide pyruvique par une amination réductrice directe (TURNER, 1960), cet acide cétonique, issu de la dégradation des sucres, hemicelluloses et celluloses de la paille, ne pouvant, dans ce milieu, être dégradé par la voie tricarboxylique. L'acide δ-aminovalérique proviendrait, selon STADTMAN (1956), de la réduction de la proline, provoquant l'ouverture du cycle de cet aminoacide. La β-alanine et l'acide γ-aminobutyrique pourraient provenir de réaction de décarboxylation, réactions qui ne nécessitent pas la présence d'oxygène et peuvent être provoquées par des microorganismes anaérobies.

2. *Différences liées à la nature des substrats.*

Les proportions d'acides aminés libres des milieux aérobies et anaérobies formés à partir d'un même substrat, la paille, sont beaucoup plus voisines lorsque ce matériel est incubé en présence de sol que lorsqu'il est incubé seul :

(fig. 1 E : $D_{SPAE\,(4+16)} - SPAN\,(4+16) = 15.62$; $D_{PAE\,(4+16)} - PAN\,(4+16) = 37.39$).

La présence de sol efface donc en partie l'effet des conditions expérimentales différentes mises en œuvre. Ceci tient à une importante propriété du sol, *son pouvoir tampon*. Celui-ci s'exerce à la fois vis-à-vis du pH et vis-à-vis du potentiel d'oxydoréduction.

Toutefois, l'*effet tampon du sol vis-à-vis du pH* ne saurait expliquer la différence de distribution des acides aminés de la paille incubée seule et de la paille incubée en présence de sol. En effet, les différences de pH des pailles incubées seules d'une part, en présence de sol d'autre part, sont relativement peu importantes et, de plus, nous avons observé qu'un plus large écart de pH n'affecte guère la répartition des acides

aminés libres : un essai complémentaire d'incubation de sol et de paille, conduit à un pH nettement différent (à la suite de la substitution, comme source azotée, de sulfate d'ammonium au carbonate d'ammonium), a en effet donné des résultats très voisins de ceux que nous avons décrits ci-dessus.

Par contre, l'*effet tampon du sol vis-à-vis du potentiel d'oxydation* — effet qui s'exerce surtout par l'intermédiaire des systèmes redox du sol, dont le principal est le système fer ferreux/fer ferrique — ainsi que, dans une certaine mesure, l'hétérogénéité des conditions d'aération du sol aérobie, sont les causes manifestes de la moindre différenciation du spectre des acides aminés du sol par rapport à celui des pailles.

TABLEAU 5

Évaluation du taux de fer ferreux présent dans les milieux incubés
(d'après le test de JACKSON (1964))

Milieux incubés	Conditions	Durée d'incubation	
		4 j	16 j
Sol + paille	Aérobiose		
Sol + glucose	—		+
Sol.....	—		
Sol + paille	Anaérobiose	+	+++
Sol + glucose	—	+++	+++++
Sol.....	—		+

En effet, dans nos essais aérobies, le sol, malgré son humidité moyenne (pF 3.1) et le brassage fréquent qu'il subit, forme de petites mottes particulièrement stables et il est probable que les intenses besoins d'oxygène qui se manifestent au début de l'incubation ne sont pas parfaitement satisfaits dans les parties du sol situées à l'intérieur de ces volumes. Cette hypothèse expliquerait notamment l'existence, dans ces milieux, de petites quantités d'acide δ-aminovalérique, acide aminé prenant naissance en milieu réducteur.

Inversement, tandis que dans les fermentations anaérobies de paille seule s'établissent rapidement des conditions réductrices, en présence de sol, dans l'anaérobiose, s'instaure tout d'abord un métabolisme aérobie fonctionnant aux dépens du fer ferrique ; il en résulte l'*apparition progressive de fer ferreux* dont nous avons pu suivre la vitesse de formation. Absent au début de la fermentation, le fer ferreux est encore peu abondant après 4 jours d'incubation anaérobie, mais son taux continue de croître avec la durée d'incubation (tabl. 5). Ces faits montrent donc que les conditions redox sont moins différentes dans les milieux sol + paille aérobie ou anaérobie que dans les pailles seules correspondantes, non pourvues de système redox à grand pou-

voir tampon. De ces plus faibles écarts de conditions redox des ensembles sol + paille, peut résulter la moindre différenciation observée dans la répartition des acides aminés libres. C'est ce que tendent à confirmer les résultats de l'étude comparée des conditions redox des sols incubés en présence de substrats et pendant des temps différents.

Tandis que dans le sol additionné de paille, les conditions anaérobies s'établissent lentement (apparition progressive du fer ferreux), dans le sol additionné de glucose, l'apparition de conditions réductrices est beaucoup plus rapide, du fait de la plus grande fermentescibilité du substrat ; bien qu'il apparaisse, en milieu « aéré », quelques signes d'anaérobiose, la différence de conditions redox est importante et rappelle, après 16 jours d'incubation, celle que réalisent, dès les premiers jours, les milieux renfermant la paille seule. Dans ces conditions, la différence de répartition des acides aminés est importante ($D_{SGAE\ (16)} - SGAN\ (16) = 46.75$) et rappelle la différence observée entre les pailles aérobies et anaérobies. De plus, il existe une grande similitude entre les conditions très réductrices du sol anaérobie ayant reçu du glucose et celles de la paille anaérobie. Or, ces milieux présentent une distribution des acides aminés libres très voisine, ce qui les situe dans la même constellation (fig. 2).

A l'opposé des sols enrichis en glucose, se placent les sols ne recevant aucun substrat organique. Ici, quelles que soient les conditions d'incubation, les conditions redox sont peu différentes, du fait de la faible consommation des milieux en oxygène. Or ici, les distances entre les milieux « aérobie » et « anaérobie » sont plus faibles que dans les autres milieux (fig. 1 E : $D_{SAE\ (4\ +\ 16)} - SAN\ (4\ +\ 16) = 13.87$).

Ces différents faits suggèrent donc l'existence d'une relation étroite entre la répartition des acides aminés libres et les conditions oxydo-réductrices.

La différenciation du spectre des acides aminés libres avec les conditions d'aération provient probablement de l'existence de seuils du potentiel d'oxydoréduction limitant les conditions de formation de certains acides aminés, l'alanine, l'acide δ-aminovalérique notamment.

C. — *Relation entre la répartition des acides aminés dans les incubations expérimentales et dans les sols en place*

Nos incubations expérimentales mettent en évidence les variations de la répartition des acides aminés libres avec les conditions d'aération et montrent ainsi la plasticité des microorganismes, avec les conditions de milieu, dans leurs réactions de synthèse et d'excrétion d'acides aminés.

Ainsi, nous voyons notamment augmenter (cf. tabl. 3), dans les incubations en l'absence d'oxygène, les proportions d'alanine, de β-alanine et d'acide γ-aminobutyrique libre. Or, nous avons noté antérieurement, dans les profils (cf. DECAU, 1969, tabl. 1, annexe 1) l'augmentation quasi générale de ces acides aminés vers la profondeur.

De telles variations de même sens rapprochent les milieux aérobies et les horizons de surface d'une part, les horizons profonds et les milieux anaérobies d'autre part, mais il existe des acides aminés (la tyrosine notamment) qui présentent des variations opposées, de sorte qu'ici encore, seule une mesure des distances globales entre ces milieux peut permettre de dégager les tendances générales.

Nous avons calculé dans ce but les distances entre le groupe des horizons de surface (Hs) et celui des horizons profonds (Hp) des mêmes sols d'une part — groupes

qui ont été définis précédemment (DECAU, 1969) — et les constellations C_1 et C_4 de la figure 2 d'autre part. Le choix de ces constellations nous a été dicté par les conditions de milieu limites qui les caractérisent. En C_1. se trouvent groupés des milieux « non incubés » mais réunissant en fait des sols dont la matière organique a été antérieurement formée en aérobiose et un sol ayant reçu de la paille et incubé en aérobiose. En C_4, se groupent des milieux typiquement anaérobies, dont un sol ayant reçu du glucose.

Par rapport à ces milieux aérobies ou anaérobies, Hs et Hp se placent différemment et nous pouvons voir (fig. 3) que Hs est plus près de C_1 que Hp ; inversement Hp est plus près de C_4.

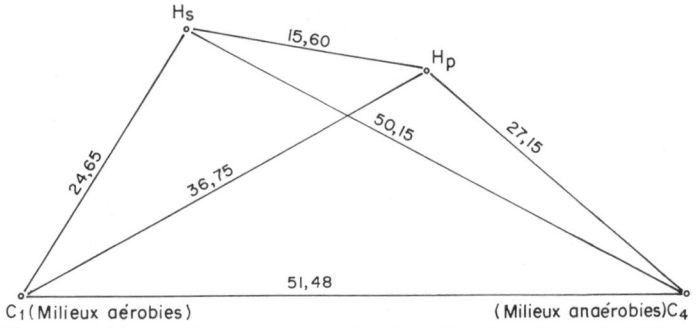


FIG. 3. — *Distances intergroupes entre la répartition des acides aminés libres des milieux aérobies ou anaérobies et la distribution des acides aminés totaux des horizons superficiels ou profonds des sols*

Il existe donc bien une analogie d'ensemble entre la répartition des acides aminés libres des milieux aérobies et la répartition des acides aminés totaux des horizons de surface ainsi qu'entre les milieux anaérobies et les horizons profonds. Il semblerait donc d'après ces résultats, que l'on puisse attribuer à la diminution du taux d'oxygène vers les horizons profonds les gradients d'acides aminés en fonction de la profondeur. Mais il est manifeste que les similitudes ne sont que partielles comme le montrent notamment les valeurs élevées des distances Hs — C_1 et Hp — C_4 et comme il apparaît aussi lorsqu'on compare les résultats du tableau 3 du présent mémoire et ceux du tableau annexe 1 du précédent (DECAU, 1969).

Ainsi, la proportion d'acide δ-aminovalérique demeure infime dans les profils, comparée à celle de certains milieux en incubation ; la proportion d'alanine ne varie pas dans les profils, avec les conditions d'aération, aussi largement que dans les fermentations expérimentales ; enfin et surtout, la tyrosine libre est très généralement plus abondante en milieu anaérobie qu'en milieu aérobie alors que sa proportion décroît, dans les profils, vers les niveaux profonds.

Cependant, ces apparents désaccords s'expliquent assez bien ; la rareté de l'acide δ-aminovalérique, la faible variation du taux d'alanine avec la profondeur, proviennent de ce que les échantillons de sol étudiés, de l'horizon de surface au pseudogley, ne présentent jamais des conditions oxydo-réductrices aussi diamétralement opposées que celles de la paille ou du sol enrichi de glucose, en incubation aérobie et anaérobie.

Les variations moindres de certains acides aminés dans les profils pédologiques

viennent aussi non seulement du pouvoir tampon du sol vis-à-vis du potentiel d'oxydo-réduction, mais encore de la provenance même de ces acides aminés. Dans les profils en effet, ont été dosés, soit les acides aminés de l'ensemble du sol, soit les acides aminés de la matière organique humifiée, et non les seuls acides aminés libres.

Il est certain que de ce fait se trouve considérablement estompé l'effet des conditions d'aération, conditions qui comportent en fait, quel que soit l'horizon étudié, une alternance d'aérobioses et d'anaérobioses de durées variables ; et ceci explique les variations moindres des proportions de certains acides aminés, tels l'acide glutamique et l'alanine, dans les profils de sols, par rapport à celles des pailles et des sols en incubation.

Quant à la présence d'une proportion plus importante de tyrosine, parmi les acides aminés libres, en milieux anaérobies, elle peut résulter du phénomène suivant : les acides aminés libres se situent à un carrefour du métabolisme et peuvent, de ce fait, subir, suivant les conditions pédoclimatiques, un sort différent. Ainsi, en milieu aéré se trouvent réalisées les conditions de synthèse de matières humiques ; en milieu anaérobie en revanche, une telle synthèse n'est guère possible. Il est donc probable qu'en aérobiose une fraction des acides aminés libres participe à la synthèse de l'humus et il est probable aussi qu'à ce phénomène participe particulièrement la tyrosine dont est bien établie l'aptitude à la polycondensation (THOMAS, 1958). En milieu réducteur, la tyrosine, ne pouvant subir le même sort, demeurerait en plus grande abondance dans le milieu.

Ceci montre la nécessité d'étudier, dans de nouvelles expériences, le sort des acides aminés libres formés en aérobiose et en anaérobiose et d'envisager plus particulièrement leur aptitude à l'incorporation dans les acides humiques. Cette étude fera l'objet de notre prochain travail.

D. — *Principaux phénomènes assurant la différenciation des proportions des acides aminés des sols*

L'examen comparé de la répartition des acides aminés dans les milieux incubés et dans les horizons du sol a permis de montrer que les écarts de distribution des acides aminés libres entre milieux aérobies et anaérobies et les écarts entre horizons de profondeur différente sont plus souvent comparables (fig. 3). Ceci traduit une parenté certaine entre la répartition des acides aminés libres et celle des acides aminés liés, inclus pour leur plus grande part dans des matières humiques (SCHARPENSEEL, 1962). Cette parenté ne saurait surprendre ; il est probable en effet que le rythme d'incorporation des acides aminés dans les matières humiques dépend de leur concentration relative à l'état libre dans le milieu.

Mais la concentration des acides aminés libres n'est pas le seul facteur susceptible d'agir sur la distribution des acides aminés des sols. En effet :

1. la distribution des acides aminés libres, extractibles à l'alcool, n'est qu'une image imparfaite de la répartition réelle des acides aminés disponibles pour construire l'humus. Des essais d'addition d'acides aminés au sol suivie d'extraction rapide par l'alcool ont permis de montrer que la récupération n'est que partielle et varie selon les acides aminés ajoutés : tandis que les acides aminés neutres sont, pour la plupart, en grande partie extractibles par l'alcool (taux de récupération supérieur à 60 p.100) les acides aminés basiques le sont beaucoup moins (PAUL et SCHMIDT, 1960) parce

qu'ils sont plus fortement retenus par les colloïdes du sol. Mais les basiques n'en ont pas nécessairement pour cela une moindre aptitude à se combiner aux composés phénoliques et à entrer ainsi dans la constitution des matières humiques.

2. Une étude de HAIDER, FREDERICK et FLAIG (1965) a montré que chaque acide aminé ne réagit pas de la même façon avec les composés phénoliques. Ainsi, lorsque sont mis en présence, dans un rapport donné, un polyphénol et un acide aminé, il se forme, sous l'action d'une phénolase, une masse de polycondensat variable suivant la nature de l'acide aminé ; avec l'hydroquinone par exemple, la proportion de tryptophane ou d'isoleucine combinée est grande tandis qu'elle est particulièrement faible pour le glycocolle ou la thréonine.

3. Bien que la proportion des acides aminés directement fixés sur les colloïdes minéraux soit probablement faible (SCHARPENSEEL, 1962), on ne peut exclure, dans certains milieux, l'éventualité d'une participation relativement importante des phénomènes d'adsorption à la répartition des acides aminés des sols. Tel pourrait être le cas notamment pour les sols d'Afrique dans lesquels les argiles dégradées ont donné naissance à des colloïdes amorphes à grand pouvoir adsorbant.

Les acides aminés basiques pourraient aussi se trouver en partie protégés contre la dégradation bactérienne grâce à leur adsorption, soit à l'état isolé, soit sous forme de protéines (complexes silicoprotéiques), et prendre de ce fait dans la répartition globale des acides aminés une plus large place. L'adsorption plus énergique des basiques pourrait d'ailleurs être à l'origine de leur dégradation moins rapide que celle des autres acides aminés lorsqu'ils sont ajoutés au sol (STEVENSON, 1956 ; COULSON, DAVIES et KHAN, 1959 ; PUTNAM et SCHMIDT, 1959) ; ce phénomène explique aussi probablement la prépondérance de ces acides aminés, observée par STEVENSON (1956) et par YAMISHITA et AKIYA (1963), dans les sols pauvres en matière organique c'est-à-dire dans des milieux dans lesquels la dégradation microbienne des acides aminés est très poussée.

4. Il est probable que l'azote n'est pas incorporé dans les composés phénoliques uniquement sous forme d'acides aminés isolés et que des peptides et des protéines peuvent aussi être fixés et combinés (TINSLEY et ZIN, 1954). Un tel phénomène expliquerait d'ailleurs les différences observées entre la répartition des acides aminés des colloïdes humiques des horizons de surface et celle des horizons profonds : en effet, les colloïdes humiques des horizons supérieurs pourraient être en grande partie formés à partir des peptides et des protéines des tissus vivants, principalement végétaux, sans qu'intervienne un remaniement important, par les microorganismes, de ces composés azotés, tandis que les acides humiques des niveaux profonds, plus évolués, résulteraient d'une plus active participation microbienne et contiendraient de ce fait, d'une part davantage d'acides aminés fixés isolément, acides aminés excrétés ou libérés par les microorganismes, d'autre part des complexes protéiques microbiens.

L'existence et l'importance relatives probables de tels mécanismes se trouve confirmée par l'étude des acides aminés de ces deux types de milieux, les acides aminés non protéiques d'origine principalement ou uniquement microbienne (acides ω aminés, acide diaminopimélique) étant moins abondants et les rapports des acides aminés neutres à chaîne courte à leurs homologues supérieurs étant moindre dans les matières humiques des horizons de surface que dans les matières humiques des niveaux profonds (DECAU, 1967).

CONCLUSION

Le présent travail a permis de montrer que la répartition qualitative et quantitative, globale et relative, des acides aminés libres de différents milieux mis en incubation varie le plus souvent à la fois avec l'aération, la durée de fermentation et la nature des substrats.

La répartition qualitative des acides aminés libres, parmi lesquels se trouvent les composés les plus courants des milieux biologiques, se modifie, principalement en anaérobiose et dans les fermentations de paille et de glucose, par l'apparition de 2 acides aminés non protéiques : l'acide β-amino-isobutyrique et l'acide δ-amino-valérique.

La répartition quantitative globale des acides aminés libres, étroitement liée à celle de l'azote minéral, apparaît ainsi, comme cette dernière, sous l'étroite dépendance des conditions d'aération, conditions qui déterminent, pour un même substrat et pour des durées d'incubations analogues, la dynamique de l'azote durant l'incubation.

La répartition quantitative relative des acides aminés libres, étudiée à partir des résultats analytiques grâce aux techniques de KENDALL et STUART (1966) et de VAN DEN DRIESSCHE (1965), fait apparaître ici encore le rôle déterminant du facteur aération. La durée d'incubation et la nature des substrats — dont dépend leur fermentescibilité — interviennent seulement par leur action sur le rythme d'établissement des conditions oxydantes ou réductrices.

Le rapprochement de ces résultats avec ceux que fournit l'étude des acides aminés totaux des profils (DECAU, 1969) a permis de mettre en évidence la parenté relative, d'une part, entre la répartition des acides aminés libres des milieux aérobies et celle des acides aminés totaux dans les horizons de surface, d'autre part, entre la répartition des acides aminés libres des milieux anaérobies et celle des acides aminés totaux des horizons profonds.

Mais la comparaison des milieux incubés et des horizons de sol fait aussi apparaître des dissemblances. Celles-ci tirent leur origine : de la différence moindre, entre les conditions d'aération des sols et des sous-sols étudiés, qu'entre les milieux incubés en aérobiose et en anaérobiose, de l'effet tampon du sol vis-à-vis du potentiel d'oxydo-réduction et de l'état différent des composés dosés. A la mobilité des acides aminés libres s'oppose en effet la stabilité relative des acides aminés totaux, en grande partie inclus dans des matières humiques et situés de ce fait dans des conditions de métabolisme différentes.

La comparaison de la répartition des acides aminés libres des milieux incubés avec celle des acides aminés totaux des sols met donc bien en lumière l'influence déterminante des conditions d'aération des sols sur la dynamique de leurs acides aminés. Mais en même temps, elle souligne — comme l'ont fait déjà apparaître les résultats de nos précédents mémoires (DECAU, 1968, 1969) la nécessité d'études nouvelles de la dynamique des acides aminés des sols et en particulier du mode d'incorporation de ces composés dans les colloïdes humiques et de leur mobilité, phénomènes dont dépend très directement la nutrition des cultures.

Reçu pour publication en mars 1969.

SUMMARY

SOME OBSERVATIONS ON THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE DISTRIBUTION OF NITROGEN IN THE SOIL.

III. — AMINO-ACIDS AND AERATION CONDITIONS

With the object of studying the influence of aeration on the production of amino-acids in soils, various different habitats (soil + straw, soil + glucose, soil alone, straw alone) were incubated under aerobic and anaerobic conditions and their free amino-acids determined after 0.4 and 16 days of incubation at 30°C. The conditions of the soil habitat (in incubated soils) and the content of mineral nitrogen (in the incubated straws) were determined at the same time.

The content of free amino nitrogen in the aerobic conditions steadily drops in the course of incubation, whereas under anaerobic conditions it reaches a minimum and then increases. Similar variations are found for mineral nitrogen (almost exclusively found as ammoniacal N) where the content decreases under aerobic conditions and passes through a minimum in an anaerobic environment.

During incubation the distribution of free amino-acids is changed. Measurement of the KENDALL and STUART intervals (1966) separating the various environments analyzed, as regards the distribution of these compounds, has enabled us to show the overall importance and the direction of the variations noted, together with the convergences and divergences in the distribution of the various free amino-acids.

Eleven out of twenty environments examined can be put into four groups characterized by their free amino-acid distribution, which groups are not necessarily differentiated in all cases by the nature of the environment, aeration conditions or stage of incubation.

However, from the results obtained, it has been possible, to analyze the effects of each factor. Thus it appears that the differentiation of spectra of free amino-acids is essentially associated with different oxy-reduction conditions in the environments examined, these differences depending on the buffering power of the environment as regards its redox potential, on the fermentability of the substrate and on the length of time involved.

These results tend to agree with those we previously obtained (DECAU, 1969) in a study of the total amino-acids in soil profiles, and on the one hand, throw light on several relationships, between aerobic incubation and surface horizons and on the other hand, between anaerobic incubation and deep horizons : on the larger molar proportions of the α-amino-acids, and the relationship of neutral short chain amino-acids to their weaker superior homologues in aerated habitats and surface horizons rather than in anaerobic, deep horizon environments. These phenomena confirm the hypothesis of the influence of aeration on the distribution of amino-acids in the profiles and thus show the important part played by micro-organisms in thus differentiating horizons.

Nevertheless this association underlines certain differences (for instance the case of tyrosine in particular) which among other things, could be caused by, the variable affinity of certain amino-acids towards incorporation in humic materials.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER MILIEUEIGENSCHAFTEN AUF DIE VERTEILUNG DES STICKSTOFFS IM BODEN

III. — AMINOSÄUREN UND BELÜFTUNGSBEDINGUNGEN

Um den Einfluss der Belüftungsbedingungen auf die Dynamik der Aminosäuren der Böden zu untersuchen, wurden verschiedene Milieus (Boden Stroh, Boden + Traubenzucker, Boden allein, Stroh allein) mit und ohne Belüftung in Aerobiose oder Anerobiose eingesetzt und ihre freien Aminosäuren nach 0,4 und 16 Tagen unter 30°C festgestellt. Die Milieueigenschaften (in der untersuchten Böden) und der Gehalt an mineralischem Stickstoff (im gegorenen Stroh) wurden gleichzeitig bestimmt.

Der Gehalt an freiem Amino-Stickstoff der belüfteten Milieus nimmt regelmässig im Laufe des Einsetzens ab, während er in den unbelüfteten Milieus nach einer Abnahme bis zu einem Mini-

mum einen Zuwachs aufweist. Aehnliche Variationen werden für den mineralischen Stickstoff (fast einzig durch ammoniakalischen Stickstoff vertreten) beobachtet, dessen Gehalt im belüfteten Milieu abnimmt und im unbelüfteten Milieu ein Minimum aufweist.

Während der Einsätze ändert sich die Verteilung der freien Aminosäuren. Die Messung der Abstände von KENDAL und STUART (1966) zwischen den verschiedenen untersuchten Milieus erlaubte, was die Verteilung dieser Zusammensetzungen anbetrifft, die gesamte Grösse und die Richtung der beobachteten Variationen, ferner die gesamten Konvergenzen und Divergenzen der Verteilung der freien Aminosäuren zu präzisieren.

Elf der zwanzig analysierten Milieus bilden vier Gruppen, die durch die Verteilung ihrer freien Aminosäuren charakterisiert wurden, die sich aber nicht in jedem Falle durch die Natur der Milieus, durch die Belüftungsbedingungen oder durch die Stufe des Einsatzes unterscheiden.

Aus der erhaltenen Ergebnissen jedoch konnte der Einfluss jedes Faktors bestimmt werden. So ergibt sich, dass die Verteilung des Spektrums der freien Aminosäuren hauptsächlich von den Unterschieden der Oxydo-Reduktionsbedingungen der analysierten Milieus abhängt. Diese Unterschiede stellen eine Funktion des Puffervermögens des Milieus gegenüber dem Redox-Potential, der Gärungsfähigkeit des Substrats und der Entwicklungsdauer dar.

Der Vergleich dieser Ergebnisse mit denen, die wir zuvor (DECAU 1969) in der Untersuchung der gesamten Aminosäuren der Bodenprofile erhielten lässt mehrere Folgerungen zu, einerseits zwischen den aerobischen Einsätzen und den Oberflächen-Horizonten, anderseits zwischen den anaeroben Einsätzen und den tiefen Horizonten, wie bedeutendere Molanteile der α-Amino-säuren und geringere Anteile der neutralen, kurzkettigen Aminosäuren gegenüber ihren höheren Homologen in den belüfteten Milieus und in den Oberflächen-Horizonten als in den anaeroben Milieus und in den tiefen Horizonten. Diese Tatsachen bestätigen die Hypothese des Einflusses der Belüftungsbedingungen auf die Verteilung der Aminosäuren in den Profilen und zeigen somit die wichtige Rolle, die die Mikroorganismen in der Differenzierung der Horizonte in dieser Hinsicht spielen.

Dieser festgestellten Annäherung gegenüber, sind auch einige Abweichungen (namentlich bezüglich des Tyrosins), die sich neben anderen Ursachen aus der wechselnden Uebergangsfähigkeit der verschiedenen Aminosäuren in Huminsäureverbindungen ergeben können, vorhanden.

РЕЗЮМЕ

К изучению влияния условий среды на распределение азота в почве. 111. — *Аминокислоты и условия аэрации.*

Ж. ДЭКО.

Для изучения влияния условий аэрации на динамику почвенных аминокислот автор провел в аэробных и анаэробных условиях опыты инкубации различных сред (почва + солома, почва + глюкоза, почва, солома) и определения их аминокислог после разных сроков экспозиции (от 0,4 до 16-ти дней), при температуре в 30 °С. Одновременно были уточнены условия среды (инкубированных почв) и содержание азота (в перебродившей соломе).

В течении инкубации содержание свободного аминного азота постепенно уменьшается в аэробных средах, в то время как в анаэробных условиях оно сперва доходит до минимального значения, а затем снова повышается. Те-же изменения были отмечены и для минерального азота (представленного почти исключительно аммониакальной формой), содержание которого тоже прогрессивно уменьшается в аэробной среде и проходит через минимальную точку в условиях анаэробиоза.

Распределение аминокислот меняется в течении инкубации. Измерение расстояний Кендалля и Стюарта (1966) разделяющих различные анализованные среды в смысле распределения их составных частей, позволило уточнить общие размеры и направление наблюдавшихся изменений, также как и совпадения или расхождения в общем распределении свободных аминокислот.

Одиннадцать из двадцати проанализированных сред об' единяются в 4 группировки характеризующиеся размещением их аминокислот, но не отличающиеся, во всех случаях, ни по природе среды, ни по условиям азрации, ни по стадиям инкубации. И несмотря на это, на основании полученных результатов, удалось проанализировать влияние каждого отдельного фактора. И выяснилось что дифференциация спектра свободных аминокислот связанна в основном с различиями окислительно — восстановительных условий анализованных сред, которые в свою очередь зависят от буферной мощности среды по отношению к потенциалу редокс, от бродильной способности субстрата и длительности ее эволюции.

Сравнение этих результатов с полученными автором (Дэко 1968 в) при изучении суммы аминокислот почвенных профилей, выявляет некоторые аналогии существующие между инкубациями в аэробных условиях и поверхностными горизонтами с одной стороны, и инкубациями в условиях анаэробии и глубокими горизонтами — с другой : более крупные молярные пропорции омега-аминокислот и более слабые соотношения между нейтральными аминокислотами с короткой цепью и их более крупными гомологами в аэробных средах и в поверхностных горизонтах, чем в средах анаэробных и горизонтах глубоких. Эти факты подтверждают гипотезу о влиянии условий аэрации на распределение аминокислот по профилям и указывают на важность роли микроорганизмов для дифференциации горизонтов в этом отношении. Сравнение это выявляет также и отклонения (особенно в случае тирозина) вызванные, кроме всяких иных причин, различной способнотью разных аминокислот ко включению в гуминовые соединения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BISERTE et *al.*, 1960. Séparation des acides aminés des milieux biologiques complexes. V. Description d'un couplage de méthodes chromatographiques et électrophorétiques. *Chromatogr.* **3**, 25-47.

BREMNER J. M., 1955. Nitrogen transformations during the biological decomposition of straw composted with inorganic nitrogen. *J. agric. Sci.*, **45**, 469-475.

CHARLOT G., 1961. *Les méthodes de la chimie analytique. Analyse quantitative minérale.* Masson et Cie., édit.

COULSON C. B., DAVIES R. I., KHAN E. J. A., 1959. Chemical studies of upland peat in North Wales. *J. Sci. Food Agric.*, **10**, 209-217.

DADD C. C., FOWDEN L., PEARSALL W. H., 1953. An investigation of the free amino-acids in organic soil types using paper partition chromatography. *J. Soil Sci.*, **4**, 69-71.

DECAU J., 1962. Variations comparées des acides aminés libres au cours de fermentations aérobies et anaérobies des pailles de blé. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 4530-4532.

DECAU J., 1967. Observations sur la répartition comparée des acides aminés dans la matière organique non évoluée et dans l'humus du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **264**, 1836-1839.

DECAU J., 1968. Contribution à l'étude de l'influence des conditions de milieu sur la répartition de l'azote dans le sol. I. Principales formes d'azote obtenues par hydrolyse. *Ann. agron.*, **19**, 653-683.

DECAU J., 1969. Contribution à l'étude de l'influence des conditions de milieu sur la répartition de l'azote dans le sol. II. Acides aminés extraits par hydrolyse. *Ann. agron.*, **20**, 35-59.

FLAIG W., 1958. Chimie des matières organiques dans le sol et leur action physiologique. *Conf. II et IV Commission Soc. internation. Ét. Sol.*, Hambourg II.

FLAIG W., 1964. Effects of microorganisms in the transformation of lignin to humic substances. *Geochim. Cosmoch. Acta*, **28**, 1523-1535.

HAIDER K., FREDERICK L. R., FLAIG W., 1965. Reactions between aminoacid compounds and phenols during oxidation. *Plant Soil XXII*, **1**, 49-54.

JACKSON M. L., 1964. *Soil chemical analysis.* Prentice-Hall, Inc.

JACQUIN F., 1960. Évolution des acides aminés pendant la décomposition de la matière organique du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1810-11.

KENDALL M. G., STUART A., 1966. *The advanced theory of statistics*. 3. Design and analysis and time series. London Griffin ed.

PAUL E. A., SCHMIDT E. L., 1960. Extraction of free amino-acids from soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 195-198.

PAUL E. A., SCHMIDT E. L., 1961. Formation of free amino-acids in rhizosphere and non rhizosphere soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 5, 359.

PUTNAM H. D., SCHMIDT E. L., 1959. Studies on the free amino-acids fractions of soils. *Soil Sci.*, **87**, 1, 22.

RAO C. R., 1952. *Advanced statistical methods in biometric research*, New York, London, Willey.

ROBERT M., 1964. Étude des sols au cours de l'épreuve d'incubation. I. Acides aminés libres. *Ann. Inst. Pasteur*, **106**, 319-325.

SCHARPENSEEL H. W., 1962. Studies with ^{14}C and ^{3}H-labelled humic acids as to the mode of linkage of their amino-acid fractions and with $^{35}SO_4$, ^{35}S-methonine and S-cystine regarding the sulphur turnover in humic acid and soil. *Radioisotopes Soil Plant Nutr. Stud. Symp.* Bombay, 115-133.

STADTMAN Th., 1956. Enzymic reduction of amino-acids : a proline reductase of amino-acid fermenting *Clostridium*, strain H. F. *Biochem. J.*, **62**, 614-621.

STEVENSON F. J., 1956. Effect of some longtime rotation on the amino-acid composition of the soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 204-208.

SWIETOCHOWSKI B., MIKLASZEWSKI S., 1964. The effect of repeated cropping with lucern on humus quality and free amino-acid composition and on crop yields in the rotation. II. The effects of lucern on the dynamic of free amino-acids in soil, as depending on weather conditions. *Rozen flebozn*, **14**, Suppl. 155-168. (Soils Fertil., 1965. n° 772).

THOMAS M., 1958. Melanin. *Encyclopedia of Plant physiology*, VIII, 1076-1082.

TINSLEY J., ZIN M. K., 1954. The isolation of lignoprotein from soil. *C. R. 5e Congr. internation. Sci. Sol*, Léopoldville, 342-347.

TURNER J. S., 1960. Fermentation in higher plants ; its relation to respiration ; the Pasteur effect. *Encyclopedia Plant physiol.*, **12**, 42-83.

VAN DEN DRIESSCHE R., 1965. La recherche des constellations de groupes à partir des distances généralisées D^2 de MAHALANOBIS. *Biom. Prax.*, **6**, 1, 36-47.

WIEGAND C. L., LEMON E. R., 1958. A field study of some plant-soil relations in aeration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 216.

YAMASHITA T., AKIYA T., 1963. Amino-acid composition of soil hydrolysates. *Soil Sci. Plant Nutrit.*, **10**, n° 1, 43-44.

Ann. agron., 1969, **20** (3), 305-315.

UN EXEMPLE DE DÉTERMINATION DE RÉFÉRENCES TECHNIQUES : LES TEMPS DE TRAVAUX. CONTRIBUTION A UN MEILLEUR CHOIX DE L'ASSOLEMENT

LE LABOUR D'AUTOMNE

H. MANICHON, M. SÉBILLOTTE

Chaire d'Agriculture de l'Institut national agronomique
16, rue Claude-Bernard, 75 - Paris 5e

SOMMAIRE

Les temps de labour d'automne pour les diverses parcelles d'une exploitation ont été enregistrés sur 6 campagnes. Un modèle a été élaboré tenant compte globalement des caractéristiques de chaque parcelle, du précédent cultural et de l'humidité du sol au cours du travail. Ce modèle a permis de mettre en évidence l'influence prépondérante de l'humidité du sol ainsi que celle, significative, de la parcelle qui semble surtout intervenir par sa forme. L'intérêt de telles références est discuté.

INTRODUCTION

Le choix de l'assolement d'une exploitation résulte de la combinaison des facteurs de production qui optimise le profit, tout en respectant diverses contraintes. Parmi celles-ci, on trouve la nécessité de pouvoir exécuter les travaux des champs, c'est-à-dire de disposer de ressources en main-d'œuvre et en traction qui équilibrent les besoins. L'étude des durées de travail par opération, de leur variabilité et de leur position dans l'année est nécessaire pour élaborer les normes techniques indispensables à la gestion de l'exploitation.

Dans le présent travail, nous exposerons les résultats obtenus pour le labour d'automne (préparation du blé d'hiver) sur l'une des exploitations de l'Institut national agronomique.

I. — CONDITIONS D'ENREGISTREMENT ET RÉSULTATS BRUTS

A. — *Conditions d'enregistrement*

L'exploitation, située sur le plateau de Palaiseau (Essonne), est menée d'une manière analogue à celles de la région. Sur 90 hectares de terres labourables (11 parcelles) la rotation suivante est pratiquée : pommes de terre, blé, orge (ou blé), fèveroles et pois, blé, orge. Le trait physique le plus marquant est le mauvais drainage des eaux pluviales et leur accumulation en surface ; ce comportement résulte de l'instabilité structurale des sols (limons battants), et d'un micro-relief qui contrarie l'évacuation de l'eau excédentaire.

Le matériel employé est celui que l'on trouve couramment sur une telle exploitation. Les labours d'automne sont effectués à une profondeur de 18 à 25 centimètres avec une charrue bisoc de 14 pouces sauf pour la dernière campagne au cours de laquelle une charrue trisoc a été employée. La puissance de traction varie de 45 à 55 chevaux.

Les relevés couvrent six campagnes culturales, depuis 1962-63, aux conditions climatiques très diverses. Chaque jour le chef de culture note par parcelle, sur une fiche hebdomadaire, la nature du travail, sa durée (connue à une demi-heure près lorsque la totalité d'une demi-journée n'est pas utilisée à la même tâche, elle englobe les temps de déplacement) et les outils employés ; par ailleurs, la pluviométrie et la température journalières sont enregistrées. Le dépouillement de ces fiches a fourni les dates et les temps des travaux, ces derniers ayant ensuite été ramenés à l'hectare (1).

B. — *Résultats bruts*

1. *Les dates de labour.*

Le tableau 1, qui situe pour chacune des six campagnes les jours de labour, montre que :

— la fin des labours est plus irrégulière que leur début ; la durée de la période de labour est variable ;

— le nombre de jours où l'on a travaillé dépend de l'année ; si l'on excepte la dernière campagne, il varie de 15 à 23 ;

— la médiane des jours de travail se confond avec le milieu de la période pour quatre des six campagnes : la répartition des jours de travail est alors régulière.

Les conditions climatiques annuelles (tabl. 2) montrent que :

— des précipitations élevées ou une sécheresse accusée fin septembre semblent retarder le début des labours ;

— des pluies abondantes peuvent interrompre les labours et ainsi allonger la période.

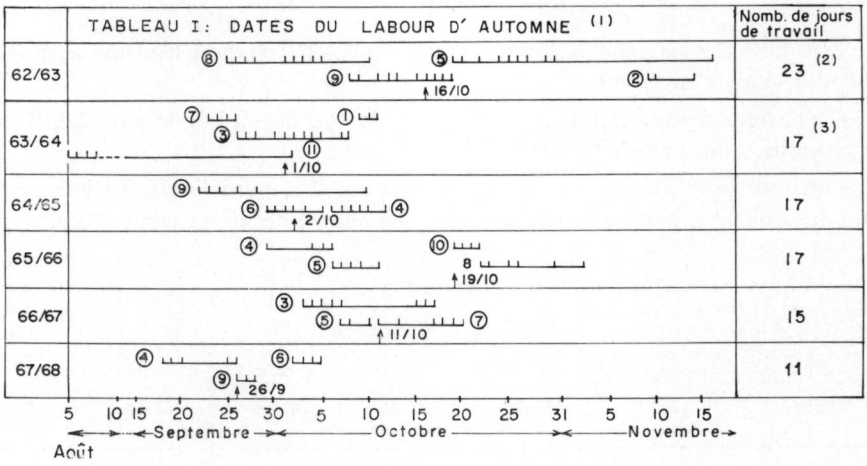
2. *Les temps à l'hectare.*

Les résultats (2) contenus dans le tableau 3, montrent que :

— le temps de travail nécessaire pour labourer un hectare oscille de 2,8 à 6,4 heures dans la majorité des cas ; les raisons qui expliquent qu'il soit beaucoup

(1) D'où une deuxième source d'imprécision pour certaines parcelles découpées différemment tous les ans et pour lesquelles la surface n'a pas été mesurée avec exactitude.

(2) Pour la dernière campagne, on a tenu compte de l'emploi d'une charrue trisoc en augmentant les temps du tiers ; la diminution du nombre de tournants est probablement compensée par leur durée légèrement plus élevée.



(1) Pour chaque parcelle, les jours de travail sont représentés par des tirets verticaux. Les médianes annuelles sont notées par des flèches.

(2) Sans compter la parcelle nº 9.

(3) Sans compter la parcelle nº 11.

TABLEAU 2

Pluviométrie des différentes campagnes

Campagnes	Pluviométries de septembre			Pluviométrie pendant le labour	Observations
	1re décade	2e décade	3e décade		
62-63	54	4	0	104	Ensemble du labour en conditions sèches. Un gros orage début septembre, pluies d'octobre localisées après la majorité du labour.
63-64	10	0	16	25	Conditions sèches, la parcelle 11 n'a pas été prise en compte.
64-65	25	28	10	24	Conditions peu humides, 2 orages en septembre, petites pluies au cours du labour.
65-66	63	17	52	46	Conditions très humides surtout à cause des pluies de septembre.
66-67	20	0	0	50	Conditions humides (nombreuses pluies pendant le labour après un mois de septembre sec).
67-68	11	50	20	90	Conditions humides.

N. B. : Pluviométries relevées au pluviomètre de l'exploitation. Les normales pour la période (poste de Trappes) sont : septembre : 58 mm ; octobre : 54 mm ; novembre : 56 mm.

plus élevé pour les parcelles 9 (62-63) et 11 (63-64) (1) rendent légitime leur élimination des calculs ultérieurs ;

— au cours d'une campagne, le temps de labour dépend de la parcelle, il varie pour chacune selon l'année ;

— malgré ces différences, les moyennes annuelles, pour l'exploitation, restent néanmoins voisines, particulièrement celles des quatre dernières campagnes.

TABLEAU 3

Temps de labour/hectare

Parcelles	62-63	63-64	64-65	65-66	66-67	67-68
1		6,2				
2	6,0					
3		6,4			5,5	
4			3,6	2,8		3,7
5	6,3			3,6	3,4	
6			4,3			4,4
7		3,0			3,1	
8	5,7			3,3		
9	12,0		3,8			4,2
10				5,2		
11		10,5				
Moyennes	6,0	5,2	3,9	3,7	4,0	4,1

Moyenne générale : 4,4 heures/ha

L'existence des variations, entre parcelles, conduit à rechercher un modèle explicatif.

II. — RECHERCHE D'UN MODÈLE EXPLICATIF

Les facteurs susceptibles de modifier le temps de labour à l'hectare, pour un matériel donné, sont les caractéristiques propres de la parcelle, l'humidité du sol et son état structural :

— la parcelle : elle intervient par sa distance à la ferme, sa forme et sa surface, sa pente et la nature de son sol ;

— l'humidité du sol : elle conditionne le comportement du sol sous l'action de la charrue. Les humidités extrêmes, par leur action sur la cohésion et l'adhérence, entraînent une augmentation de l'effort de traction à appliquer ;

(1) Ces deux résultats ne sont pas comparables aux autres : le premier (9-62/63) correspond à un début de labour en planches bombées qui n'a pas été poursuivi ; le second (11-63/64) est enregistré sur une parcelle qui a un comportement très différent des autres (affleurements de meulière, engorgement hivernal) ; elle est menée hors rotation.

— l'état structural : le degré d'ameublissement du sol modifie le glissement de la bande de labour sur le versoir de la charrue, ainsi que l'adhérence des roues du tracteur. Cet ameublissement diffère, au moment du labour, suivant le précédent cultural et les techniques qu'il implique.

A. — *Élaboration du modèle et résultats*

On est donc conduit à rechercher un modèle mathématique qui relie ces facteurs au temps de labour à l'hectare, en admettant qu'à chaque résultat x_{ij} (i : numéro de la parcelle, j : année) du tableau 3 correspond une variable aléatoire normale X_{ij}, toutes ces variables étant supposées avoir la même variance.

A cause du faible nombre de résultats expérimentaux (de plus les parcelles non répétées n'ont pas pu être prises en compte), on a retenu un modèle additif, c'est-à-dire sans interactions explicitées, dans lequel les facteurs interviennent de la manière suivante :

— La parcelle : dans l'impossibilité de faire intervenir individuellement toutes ses caractéristiques ou d'en privilégier certaines, on a choisi d'exprimer son influence d'une manière globale. Chaque parcelle est représentée par un paramètre « p_i ».

— L'humidité du sol : faute d'enregistrement systématique, on a caractérisé chaque résultat par un nombre a_{ij} représentatif de l'humidité moyenne du sol au cours du labour en utilisant les valeurs locales des précipitations. Pour déterminer a_{ij} on a supposé, considérant qu'il s'agit, ici, de la période de réhumectation :

qu'une même pluie avait les mêmes répercussions sur l'humidité du sol pour toutes les parcelles ;

que le jour de la pluie, l'humidité était proportionnelle à la hauteur d'eau, et qu'elle diminuait ensuite linéairement de telle façon qu'en fin de période, la hauteur d'eau contenue dans le sol soit la différence entre les pluies et l'évapotranspiration potentielle (formule de Turc). Ceci implique en particulier que les pertes par drainage sont négligeables.

On obtient ainsi, pour chaque jour de travail sur une parcelle, un nombre représentant l'humidité du sol (1).

TABLEAU 4

Coefficients d'humidité pondérée (valeurs arrondies)

Parcelles	62-63	63-64	64-65	65-66	66-67	67-68
3		0			30	
4			10	100		30
5	10			100	30	
6			10			50
7		10			40	
8	0			90		
9			10			50

(1) On a pu vérifier que les chiffres calculés ainsi conduisaient bien au même classement que les enregistrements d'humidité existant sur certaines parcelles.

Chaque résultat de temps de labour est enfin caractérisé par un coefficient d'humidité pondérée a_{ij} (tabl. 4) obtenu en additionnant les produits, pour chaque jour de travail, de l'humidité correspondante par le pourcentage du temps total passé sur la parcelle.

On a admis que pour représenter l'influence de l'humidité et, en particulier, des valeurs extrêmes, sur l'effet de traction et la vitesse d'avancement, il suffisait de choisir une fonction du second degré de a_{ij}.

— L'état structural : pour les parcelles dont le sol est ameubli en surface, le temps de labour est corrigé par un coefficient « d » ; il s'agit des cas où le blé suit une culture de pommes de terre (on a négligé les déchaumages, qui sont superficiels et très antérieurs au labour).

Le modèle choisi est ainsi :

$$X_{ij} = p_i + ma_{ij} + na_{ij}^2 + d + \sigma G_{ij}$$

m et n étant les coefficients de la fonction du second degré qui traduit l'action de l'humidité de sol, σ la variance des variables aléatoires X_{ij}, et G_{ij} les variables aléatoires normales réduites correspondantes.

L'estimation des paramètres du système conduit aux valeurs du tableau 5 :

TABLEAU 5

Valeurs arrondies des paramètres

$M = -0{,}036$	$p_3 = +6{,}1$	$p_7 = +3{,}4$
$n = +0{,}000\,19$	$p_4 = +4{,}1$	$p_8 = +5{,}0$
$d = +0{,}7$	$p_5 = +5{,}2$	$p_9 = +4{,}5$
	$p_6 = +4{,}5$	

B. — *Discussion*

La validité du modèle mathématique élaboré peut s'apprécier globalement par le rapport entre la variance initiale des résultats (1,558) et la variance résiduelle (0,599), non explicitée, du modèle. Ce rapport est ici de 2,6 ; les facteurs retenus ont donc permis de rendre compte d'une fraction importante des variations. On est donc fondé à discuter les résultats.

1. *Influence de la parcelle.*

Le test d'égalité des valeurs p_i montre qu'elles ne peuvent être considérées comme égales (F calculé : 15,66 ; F théorique à 0,01 : 8,47). La parcelle influe donc sur le temps de labour à l'hectare. Les caractéristiques propres des parcelles n'ont pu être explicitées dans le modèle mathématique, le nombre de données étant insuffisant.

On ne pourra donc guère aller très loin dans l'explication des différences entre parcelles. Néanmoins, la forme des parcelles semble devoir jouer ici, dans le cas du labour, un rôle prépondérant.

Dans le tableau 6, les parcelles sont classées selon les p_i croissants et sont caractérisées par leur forme.

On voit donc que lorsque les grands côtés de la parcelle ne sont pas parallèles, les coefficients p_i sont plus élevés. On voit aussi qu'aux p_i les plus faibles correspondent les rapports longueur sur largeur les plus forts.

Cette concordance entre la forme des parcelles et les valeurs des p_i nous montre bien la prédominance de cette caractéristique. Quant aux autres, leur influence est difficilement chiffrable (1).

TABLEAU 6

Formes des parcelles

Parcelles	*pi*	Forme
7	2,4	Grands côtés parallèles. Rapport long./larg. élevé
4	4,1	Grands côtés parallèles. Rapport long./larg. élevé
9	4,5	Grands côtés parallèles. Rapport long./larg. faible
6	4,5	Grands côtés non parallèles
8	5,0	Grands côtés non parallèles.
5	5,2	Grands côtés non parallèles
3	6,1	Triangle.

Le sol de chaque parcelle est hétérogène et donc les interactions climat-état du sol varient ; les pentes, bien que faibles, ne sont pas constantes. Il faudrait procéder, dans ces conditions, à des chronométrages, détaillés et répétés, sur plusieurs années. Ainsi le choix, pratiquement imposé, du critère global « p_i » pour traduire l'influence de la parcelle dans le modèle, apparaît, *a posteriori*, justifié (2).

2. *Influence de l'humidité du sol.*

La variabilité de l'effort de traction, entraînée par les variations d'humidité du sol, se répercute sur la vitesse d'avancement du tracteur et donc sur le temps de travail à l'hectare. Il faut y ajouter l'influence de l'humidité de la surface du sol sur le glissement des pneumatiques, qui peut aller jusqu'au patinage. On était ainsi fondé à traduire dans le modèle l'action de l'humidité du sol par une *fonction de second degré* dont les paramètres sont « m » et « n ».

Pour tester la significativité des résultats, on a choisi de prendre le seuil 20 p. 100 qui semble compatible avec le nombre de résultats et la puissance des tests.

L'existence d'une influence de l'humidité du sol sur le temps de labour à l'hectare est mise en évidence par le calcul de l'intervalle de confiance de $ma_{ij} + na_{ij}^2$ (fig. 1). On voit que celui-ci, dans la gamme d'humidité rencontrée ($0 \leqslant a_{ij} \leqslant 100$) ne contient pas l'axe des abscisses et se situe au-dessous de lui. Il y a donc une diminution significative du temps de labour lorsque l'humidité augmente, toutes les autres variables étant fixées. Cette diminution est importante, allant jusqu'à plus de 2 heures par hectare.

(1) Dans les valeurs pi se trouvent également compris les temps nécessaires aux réglages ; ils varient d'une parcelle à l'autre et au cours de la période de labour. Les temps de déplacement, ferme-parcelle, sont aussi dans les pi ; leurs différences sont minimes comparées aux temps de travail.

(2) L'introduction dans le modèle du coefficient de forme de la parcelle à côté d'un paramètre pi représentant les autres caractéristiques non explicitées, aurait encore diminué la puissance des tests.

Par contre, on ne peut malheureusement pas affirmer que le phénomène se traduit par une parabole présentant un minimum : le test de Student appliqué à n, coefficient du terme du second degré en a_{ij}. ne permet pas d'affirmer que celui-ci est différent de zéro (t calculé : 0,779 — t théorique à 20 p. 100 : 1,440). On n'a pas, d'autre part, relevé d'humidité supérieure à $a_{ij} = 100$, si bien qu'on ne peut préciser l'allure du phénomène au-delà de cette valeur. Ces résultats pour imprécis qu'ils soient en ce qui concerne les fortes humidités, ne sont pas en contradiction avec les hypothèses faites ; les propriétés mécaniques de la terre humide précédemment rappellées permettent de penser qu'après la diminution que nous avons établie, le temps de labour par hectare augmenterait pour des humidités supérieures du sol.

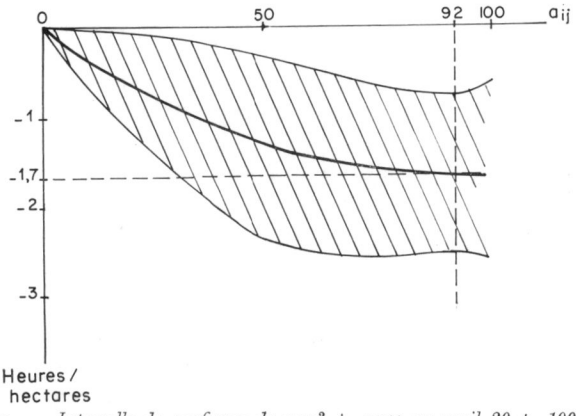


FIG. 1. — *Intervalle de confiance de* $na_{ij}^2 + ma_{ij}$ *au seuil 20 p. 100*

Il est enfin intéressant de voir quelle est la signification de cette valeur $a_{ij} = 100$ de l'humidité du sol, valeur pour laquelle la diminution du temps est considérable. Les enregistrements d'humidité existant sur l'exploitation donnent à penser qu'elle correspond sensiblement à l'humidité de ces sols quand ils sont à la capacité au champ, or les humidités de ces sols lorsqu'ils sont à la capacité au champ et à leur limite inférieure de plasticité sont voisines. Il est alors probable que l'agriculteur évitera d'effectuer ses labours d'automne en conditions plus humides s'il veut réaliser un profil cultural adéquat.

3. *Influence de l'état structural.*

La valeur du test de Student-Fischer ne permet pas d'affirmer que l'état structural a une action significative. Il faudrait multiplier les observations pour pouvoir conclure. Néanmoins, le signe positif du paramètre « d » est en accord avec les hypothèses relatives à l'influence du degré d'ameublissement du sol. On notera toutefois qu'un labour derrière pommes de terre dans cette catégorie de sol entraîne presque toujours un excès de terre fine qui risque d'être nuisible si l'automne est pluvieux. Il est donc possible que le signe du paramètre soit également dû au souci de l'agriculteur de diminuer certaines années l'inconvénient précédent en réduisant la vitesse d'avancement du tracteur.

III. — INTÉRÊT DES RÉSULTATS

La détermination du système d'exploitation consiste en particulier à choisir des cultures et à déterminer la surface de chacune sur l'exploitation. Ces surfaces doivent être telles que le temps nécessaire pour y effectuer les travaux culturaux soit compatible avec les ressources à la période considérée, ce qui revient à écrire pour l'exploitation.

$$\sum_{hk} \sigma_h \, \theta_{hk} \leqslant r$$

avec : σ_h surface de la culture h, θ_{hk} temps moyen à l'hectare pour l'opération k et pour l'exploitation, r temps de travail disponible durant la période considérée; pour chaque opération on a :

$$\theta_{hk} = \frac{\sum_i x_{ij} \times s_i}{\sum_i s_i} \quad (s_i \text{ surface de la parcelle } i)$$

La connaissance des temps θ_{hk} est donc indispensable. Or, le modèle élaboré plus haut montre que, pour le labour, x_{ij} varie avec les caractéristiques de la parcelle, son histoire et le climat ; θ_{hk} dépendra donc, chaque année, des parcelles qui sont cultivées et pour certaines opérations culturales, de leur humidité. Si l'assolement est fixé pour plusieurs années (répartition constante des σ_h) l'agriculteur recherchera :

— chaque année la valeur θ_{hk} minimum ; c'est-à-dire qu'il labourera lorsque l'humidité du sol sera la plus favorable ;

— d'une année sur l'autre des θ_{hk} aussi voisins que possible ; il combinera donc en conséquences ses parcelles.

Si l'assolement est déterminé annuellement, l'agriculteur cherchera à minimiser le produit $\sigma_h \theta_{hk}$; il jouera donc simultanément sur les périodes d'humidité favorable et sur le choix des parcelles à labourer.

Mais la détermination d'un système de production optimum se fera en tenant compte de l'ensemble des travaux à réaliser au cours d'une période donnée et de l'ensemble des périodes de l'année, ou du moins des plus contraignantes ; en conséquence, l'assolement et la combinaison des parcelles qui seront adoptés n'entraîneront pas forcément des temps de labour minimum.

Il serait utile, par d'autres enregistrements sur des exploitations de la même région, de connaître, dans le cadre d'assolements relativement fixés, les valeurs θ_{hk} par grandes catégories de sols. En effet, s'il s'avérait que ces différentes valeurs θ_{hk} ne variaient pas trop, leur espérance mathématique pourrait, *en première approximation*, servir de temps standard pour la détermination des systèmes de production ; ils seraient ensuite précisés en tenant compte des caractéristiques propres de chaque exploitation.

Dans cet esprit, nous avons déterminé pour le labour d'automne, sur le domaine de Palaiseau, les intervalles dans lesquels sont susceptibles de se trouver comprises,

chaque année, avec une probabilité donnée, les valeurs de θ_{hk} ; c'est ainsi que 9 années sur 10 et 8 années sur 10, θ_{hk} sera compris respectivement entre 3,1 et 5,8 h/ha et entre 3,4 et 5,5 h/ha, la valeur moyenne étant 4,4 h/ha. L'amplitude de ces intervalles est assez forte ; il serait intéressant de la réduire. Les résultats précédents conduisent à penser que l'influence de l'humidité du sol, et donc du climat, est prépondérante. Il est donc nécessaire d'avoir de tels enregistrements sur un plus grand nombre d'années afin de tenir compte correctement de la variabilité du climat dans la détermination de ces intervalles.

CONCLUSION

L'exploitation statistique de petites séries de résultats est toujours difficile. Cependant, ces six campagnes de labour d'automne ont permis de dégager des indications précieuses pour l'organisation du travail sur une exploitation ; elles nous incitent à poursuivre l'effort d'enregistrement. En particulier, on peut ainsi espérer mieux analyser l'influence respective des facteurs retenus, mieux cerner le rôle des aléas climatiques et éventuellement aboutir à définir des références locales sous forme d'intervalles de confiance prévisionnels adaptés aux exploitations.

L'ampleur des variations observées dans le temps de labour, qu'elles soient dues aux parcelles ou au climat, rend difficile l'utilisation optimum de la main-d'œuvre et des moyens de traction sur une exploitation. Bien que le labour, malgré son importance dans les temps de travaux, ne soit pas la seule opération à prendre en compte, ces résultats conduisent à penser qu'il faudra développer l'étude de programmes qui tiennent compte des aléas climatiques.

Reçu pour publication en avril 1969.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier, ici, M. ESCHENBRENNER qui dirige l'exploitation de l'I. N. A., à Palaiseau, et qui a bien voulu accepter le surcroît de travail que représentent ces enregistrements ; nous remercions également M. LEFORT, professeur de mathématiques à l'I. N. A., pour ses nombreux conseils.

SUMMARY

AN EXAMPLE OF THE DETERMINATION OF TECHNICAL REFERENCES : WORKING TIMES. A CONTRIBUTION TO A BETTER CHOICE OF CROP ROTATION

The daily periods of autumn working, in respect of the sowing of wheat, have been recorded for the past 6 years at the experimental station of *Institut national agronomique* near Paris. These are loamy soils.

A mathematical model has been developed, covering :

— the overall characteristics of the plot (distance from the farm, shape, slope etc.),
— the mean moisture content of the soil during the work,
— the previous crop.

Having no regular recordings of the mean moisture contents, the authors have calculated, on the basis of the total precipitation and the evaporation-transpiration potential, a characteristic figure for the respective moisture contents.

The effect of the humidity content is represented by a second degree function. The results indicate that the plot characteristics and the soil moisture content have a significant effect on the working time, the moisture content being responsible for the most marked variations.

The significance of these results is discussed in relation to the choice of a crop rotation regime and the value of regional reference values.

ZUSAMMENFASSUNG

EIN BEISPIEL DER BESTIMMUNG VON TECHNISCHEN REFERENZEN : DIE ARBEITSZEITEN. BEITRAG ZU EINER BESSEREN WAHL DER FRUCHTFOLGE

Die für die Weizensaat notwendigen täglichen Arbeitszeiten des Herbstpflügens werden seit 6 Jahren in dem Nationalen Landwirtschaftlichen Institut, bei Paris, eingetragen. Es handelt sich dort um lehmige Böden.

Ein mathematisches Modell wurde hergestellt für folgende Faktoren :

— die Landparzelle in ihrer Gesamtheit, (Entfernung von dem Hof, Form, Gefälle...)
— die durchschnittliche Feuchtigkeit des Bodens im Laufe des Pflügens,
— die vorher angebauten Kulturen.

Da keine regelmässige Eintragungen der Feuchtigkeit zur Verfügung standen, berechnen die Verfasser aus den Niederschlagsmengen und der potentiellen Verdampfungsausschwitzung eine Kennziffer für die jeweilige charakteristische Feuchtigkeit.

Die Wirkung der Feuchtigkeit wird durch eine Funktion des zweiten Grades ausgedrückt. Die Ergebnisse unterstreichen einen bezeichnenden Einfluss der Landparzelle und der Feuchtigkeit des Bodens auf die Arbeitszeit des Pflügens. Dabei werden die stärksten Variationen durch die Feuchtigkeit ausgeübt.

Der Wert dieser Ergebnisse für die Wahl einer Fruchtfolge und der Nutzen von Gebietsreferenzen werden erläutert.

РЕЗЮМЕ

Пример определения технической справки .: длительность работ. К изучению выбора правильного севооборота.

М. СЭБИЙОТТ, Х. МАНИШОН.

Длительность осенних вспашек перед посевом пшеницы регистрировалась каждый день в течении 6-ти лет в хозяйстве Национального Агрономического Института под Парижем, на суглинистых почвах.

Авторы разработали математическую модель заключавшую :

— общность сведений о делянке,
— среднюю влажность почвы во время вспашек,
— номенклатуру предшествовавших культур.

Так как в распоряжении авторов не имелось регулярных регистраций влажностей, им пришлось вычислить величины характеризующие разные влажности и представить эффекты влажности в виде формулы второй степени.

Полученные результаты указывают что характер делянки и влажность ее почвы имеют показательное влияние на длительноть вспашки, причем влажность — вызывает наибольшие изменения.

В заключение — рассматривается значение полученных результатов для выбора правильного севооборота и обсуждается польза классификации справок по областям.

Ann. agron., 1969, **20** (3), 317-326.

ACTION DES NITRITES SUR LES VÉGÉTAUX

F. LEMAIRE

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Le rôle d'aliment azoté des nitrites est démontré lorsqu'ils sont employés seuls. Le rôle toxique apparaît pour les apports importants ; mais pour un même apport de nitrites il est plus faible en présence d'une alimentation ammoniaco-nitrique suffisante.

INTRODUCTION

L'origine des nitrites dans le sol peut être double :

— D'une part, les nitrites peuvent se former dans le sol au cours de la minéralisation des matières organiques azotées. Ils peuvent s'y accumuler sous certaines conditions et la teneur du sol en ces composés peut alors atteindre par kg de sol séché à l'air 0,25 mg dans des sols de rizières (METZGER et JANSSEN, 1928), ou 5,43 mg en champs irrigués (GREAVES et *al.*, 1917). Des accumulations de nitrites peuvent également se produire dans des sols alcalins (FEHER et VAGO, 1920) ou dans des sols enrichis en $CaCO_3$ ou $MgCO_3$ (OKE, 1966).

— D'autre part, les nitrites peuvent être apportés au sol par les engrais, par exemple par le nitrate de chaux (SCHLOESING, 1905 ; GRANDEAU, 1906 ; LENGLEN, 1947). Une accumulation temporaire de nitrites est observée aussi dans des sols de pH = 7,4 recevant de l'urée (COURT et *al.*, 1962 ; PAUL et POLLE, 1965) ou dans des sols calcaires placés à basse température après avoir reçu une fertilisation à base d'engrais ammoniacaux (CHAPMAN et LIEBIG, 1952 ; TYLER et *al.*, 1959 ; JUSTICE et SMITH, 1962).

Quelles sont les conséquences de la présence ou de l'accumulation de nitrites dans le sol sur la croissance des végétaux ?

Il semble d'après les travaux de SCHULTZ (1903), SCHLOESING (1905), STUTZER (1906), GRANDEAU (1906), PERCIABOSCO et ROSSO (1909), EGGLETON (1935), OKE (1966) que les nitrites peuvent être utilisés par la plante comme aliment azoté.

Mais d'autres auteurs ont montré que les nitrites peuvent se montrer toxiques pour la plante dans certaines conditions.

Ainsi, selon BIRNER et LUCANUS (1866) les jeunes racines d'avoine jaunissent au contact d'une solution nutritive contenant 0,25 pour 100 de KNO_2 et la mort de la plantule survient après dix jours de végétation. Les nitrites se montrent également nuisibles pour la germination de plusieurs autres espèces végétales (STUTZER, 1906).

Cette toxicité est en relation avec le pH du milieu : les nitrites sont d'autant plus toxiques que le pH est bas (FEHER et VAGI, 1926 ; FRAPS et STERGES, 1930 ; MEVIUS et DIKUSSAR, 1930 ; CURTIS, 1949 ; BINGHAM et *al.*, 1954 ; OSAWA et LORENZ, 1968).

Par exemple, à pH 6,5 pour obtenir une réduction de 50 p. 100 dans les rendements de l'orge, du haricot, de la tomate, il est nécessaire d'apporter 40 à 50 mg d'azote nitreux par litre de solution nutritive alors qu'à pH 4,1 l'addition de 3 mg d'azote nitreux suffit pour provoquer la même baisse de rendement.

Toutes ces observations ont été faites sur des cultures en pots sur solutions nutritives ou sur sol. Des essais en plein champ ont montré que la toxicité apparaissait pour des doses supérieures à 500 kg/ha de nitrite de soude, qu'elle variait avec la plante (navet, betterave, avoine, blé, orge et prairies), avec la date d'application des nitrites, les conditions climatiques (VAN DEN HENDE, 1950).

En raison des résultats divergents obtenus par les auteurs, une étude a été entreprise sur les rôles nutritionnels ou toxiques des nitrites pour les plantes. En effet, les nitrites peuvent constituer un aliment par l'azote qu'ils contiennent ou se montrer toxiques par la forme sous laquelle l'azote est présent.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. *Matériel expérimental*

— Le matériel végétal utilisé dans les expériences est constitué par du ray-grass hybride, var. I_0, cultivé dans de petits pots en matière plastique contenant un kg de sol selon la méthode définie par CHAMINADE (1960).

— Le substrat est un sous-sol de limon dont les caractéristiques sont les suivantes :

Argile	12	p. 100	pH	6,5	
Limon	24,5	—	Matières organiques totales	6	p. 1 000
Sable fin	52	—	N total	0,47	—
Sable grossier	7,7	—			

— La fertilisation minérale, exception faite de l'azote, est apportée avant le semis, en quantités suffisantes, par mélange intime avec le substrat (P_2O_5 = 500 mg ; K_2O = 330 mg ; S = 100 mg ; Mg = 75 mg ; oligo-éléments sous forme de nutramine = 15 mg par kg de sol). Selon le type d'essais réalisés, la fertilisation azotée est ajoutée en une seule fois avant le semis ou chaque semaine pendant un mois.

— Une quantité d'eau (260 ml) est apportée à chaque pot au départ de la culture et le poids des pots est maintenu constant à la suite de contrôles journaliers.

— La culture est effectuée sous abri vitré. Une coupe est faite un mois après le semis. La récolte est séchée puis pesée. Sa composition chimique est ensuite déterminée.

2. *Techniques de dosage*

— Dosage des nitrites : l'extraction des nitrites du sol est réalisée par agitation mécanique du sol pendant deux heures dans une solution de $CaCl_2$ à 10 p. 100 (rapport $\frac{\text{volume } CaCl_2 \text{ 10 p. 100}}{\text{poids de sol}} = \frac{5}{1}$). Les nitrites sont déterminés colorimétriquement par la méthode de LOMBARD (1913).

— Mesure de l'évapotranspiration : la technique de culture en petits vases de végétation à poids constant permet de connaître la quantité d'eau évapotranspirée chaque jour.

EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

I. — *Évolution de l'azote nitreux dans le sol nu*

Afin de connaître l'évolution des nitrites dans le sol utilisé en l'absence de toute culture, il a été procédé à l'expérience suivante :

— 20 ml d'une solution de $NaNO_2$ à 29,57 g/l, correspondant à 120 mg azote nitreux, sont mélangés à un kg de sol ;

— l'humidité du sol est maintenue égale à la moitié de la capacité maximale de rétention du sol pendant la durée de l'expérience ;

— les pots sont conservés d'une part pendant une heure et d'autre part pendant un mois à l'obscurité, à 20°C (température du laboratoire) ou à 40°C (étuve). Après ces délais, les teneurs du sol en nitrites sont déterminées.

Les résultats obtenus (tabl. 1) montrent que les nitrites n'ont pas évolué dans le sol utilisé.

TABLEAU 1

Évolution des nitrites dans le sol en l'absence de toute culture

mg N nitreux apporté	mg N nitreux retrouvé			
	après 1 heure		après 1 mois	
	20°C	40°C	20°C	40°C
120	98	98	101	106

II. — *Utilisation de l'azote nitreux dans le sol cultivé*

a) *Action de l'azote nitreux en l'absence de toute autre source azotée exogène.*

1. *Influence d'un apport unique d'azote nitreux.*

Les courbes d'action de l'azote sous forme nitrique ou nitreuse sont réalisées en apportant des quantités croissantes (0 à 120 mg N par pot) de nitrate de soude ou de nitrite de soude, les besoins des autres éléments fertilisants étant assurés largement.

Les résultats obtenus sont réunis dans le tableau 2 et les figures 1 et 2.

TABLEAU 2

Teneurs en azote total (p. 100 MS) *du ray-grass en fonction de la dose et de la forme d'azote apporté*

N mg/kg sol.	0	6	12	24	36	60	120
N p. 100 (nutrition nitrique). . .	1,33	1,36	1,39	1,25	1,43	1,50	1,60
N p. 100 (nutrition nitreuse). . .	1,33	1,36	1,30	1,38	1,35	1,58	1,63

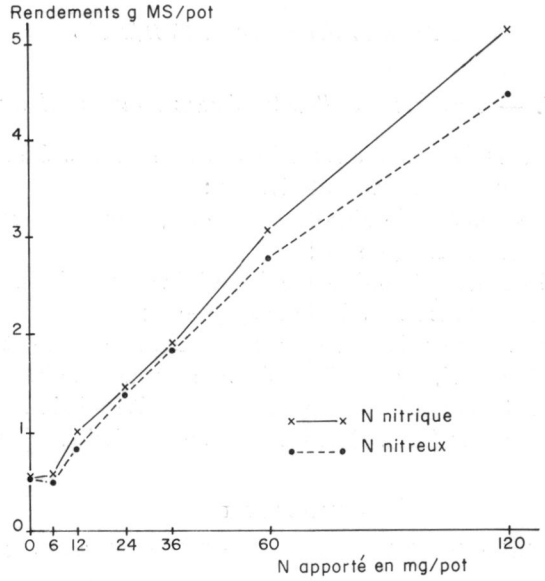


FIG. 1. — *Rendements du ray-grass en fonction de la dose et de la forme d'azote apporté*

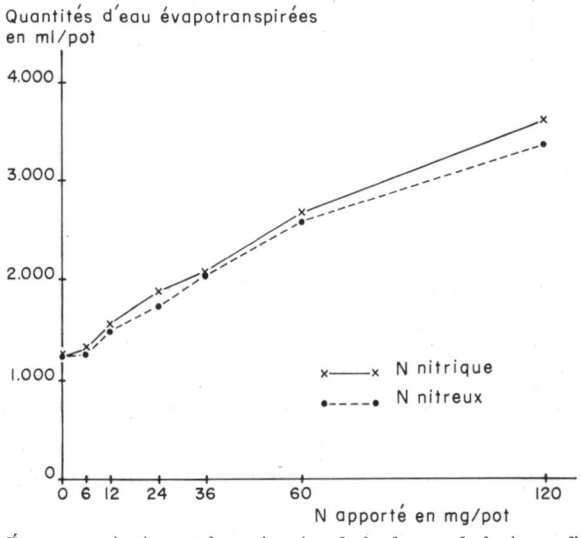


FIG. 2. — *Évapotranspiration totale en fonction de la dose et de la forme d'azote apporté*

La courbe des rendements (fig. 1) pour la nutrition azotée nitreuse est semblable à celle obtenue avec une nutrition nitrique, et cette analogie est observée jusqu'à la dose de 36 mg azote par kg sol. Les deux dernières doses de nitrites utilisées provoquent une diminution de rendement, comparativement à l'action de doses équivalentes de nitrates. Ce fait indiquerait une moins bonne utilisation de l'azote nitreux à doses fortes.

La richesse en azote des plantes (tabl. 2) est semblable pour une même quantité d'azote apporté, que cet azote soit fourni sous forme nitrique ou sous forme nitreuse.

Les quantités d'eau évapotranspirées par le ray-grass sont analogues pour une même dose d'azote quelle que soit la forme sous laquelle l'azote est apporté (fig. 2).

Les nitrites contribuent donc à la nutrition azotée de la plante lorsqu'ils sont la seule source d'azote dans le milieu.

2. *Influence d'apports répétés d'azote nitreux.*

Une expérience analogue à la précédente est réalisée mais l'azote nitreux (ou l'azote nitrique) est apporté non plus en totalité avant le semis comme précédemment, mais chaque semaine pendant un mois à des doses allant de 0 à 60 mg.

Les résultats sont représentés sur la figure 3 où sont portés les rendements en matière sèche en fonction des doses d'azote apporté.

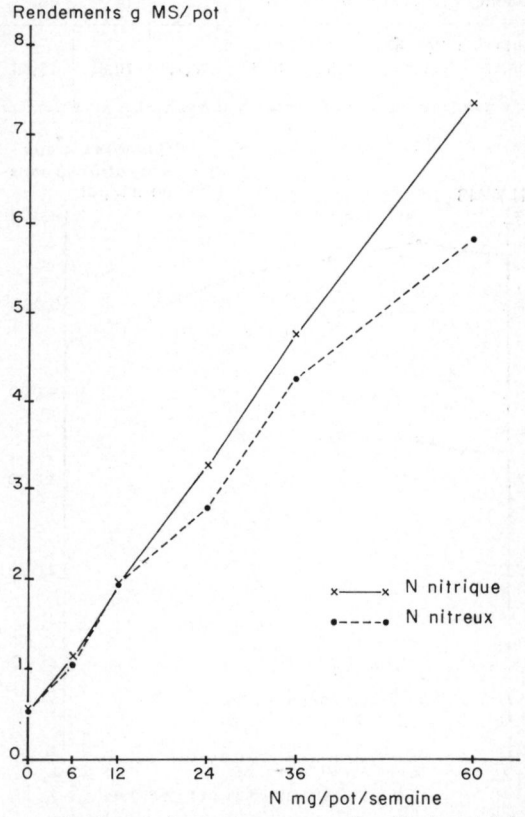


FIG. 3. — *Rendements du ray-grass en fonction des doses hebdomadaires d'azote apportées sous différentes formes*

Les courbes de rendement obtenues pour chacune des formes d'azote se différencient à partir de la dose 24 mg d'azote par semaine et par pot. En présence de 24 et 36 mg d'azote nitreux, les baisses de rendement atteignent 14 p. 100 et 20 p. 100 quand la dose atteint 60 mg d'azote par semaine et par pot.

Les nitrites ont donc un effet dépressif mais il faut préciser que cet effet est observé dans les conditions suivantes : température moyenne journalière : 17°C ; température maximale moyenne : 23°C ; radiation globale moyenne 570 cal/cm²/jour. Ce point est à signaler car NOWAKOWSKI et *al.* (1965, 1966) ont montré que la température et l'intensité lumineuse exercent une influence sur l'absorption et le métabolisme de l'azote nitrique et ammoniacal chez le *Ray-grass d'Italie.*

b) *Action de l'azote nitreux en présence d'une autre source azotée.*

Dans cet essai, un apport d'azote sous forme de nitrate d'ammoniaque est réalisé chaque semaine (120 mg d'azote par pot) pour neutraliser l'effet d'aliment azoté

TABLEAU 3

Influence d'apports répétés de nitrites en présence d'une nutrition azotée optimale sur les rendements en MS du ray-grass

mg N nitreux par pot et par semaine	0	6	12	24	36	60
Rendements en g MS par pot	10,51	10,62	10,59	10,81	11,36	10,74

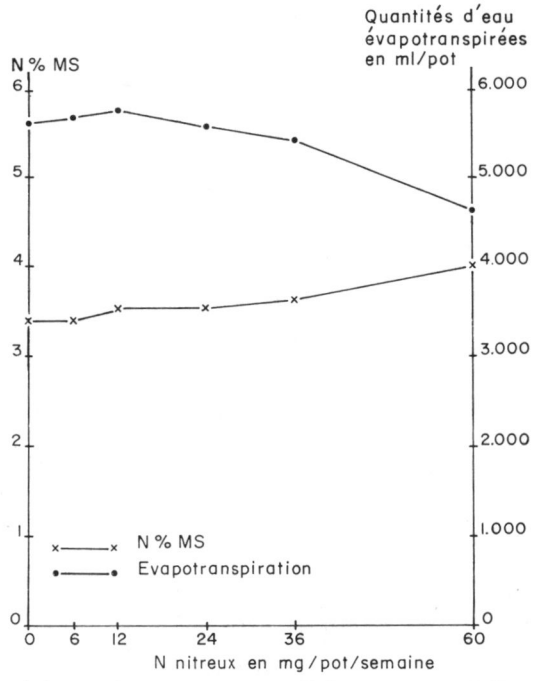


FIG. 4. — *Variations de la teneur en azote total du ray-grass et de l'évapotranspiration en fonction des doses hebdomadaires d'azote nitreux*

des nitrites. De plus, des quantités variables (0 à 60 mg d'azote par pot) de nitrite de sodium sont ajoutées toutes les semaines pendant quatre semaines. La récolte est effectuée après un mois de culture.

Les résultats sont donnés dans le tableau 3 en ce qui concerne les rendements en MS des récoltes et sur la figure 4 pour les teneurs en azote total du ray-grass et les quantités d'eau évapotranspirées pendant la culture.

Les rendements (tabl. 3) sont indépendants de la dose d'azote nitreux apporté. La dose d'azote équivalente à 60 mg d'azote nitreux par pot et par semaine ne donne lieu apparemment à aucun phénomène de toxicité.

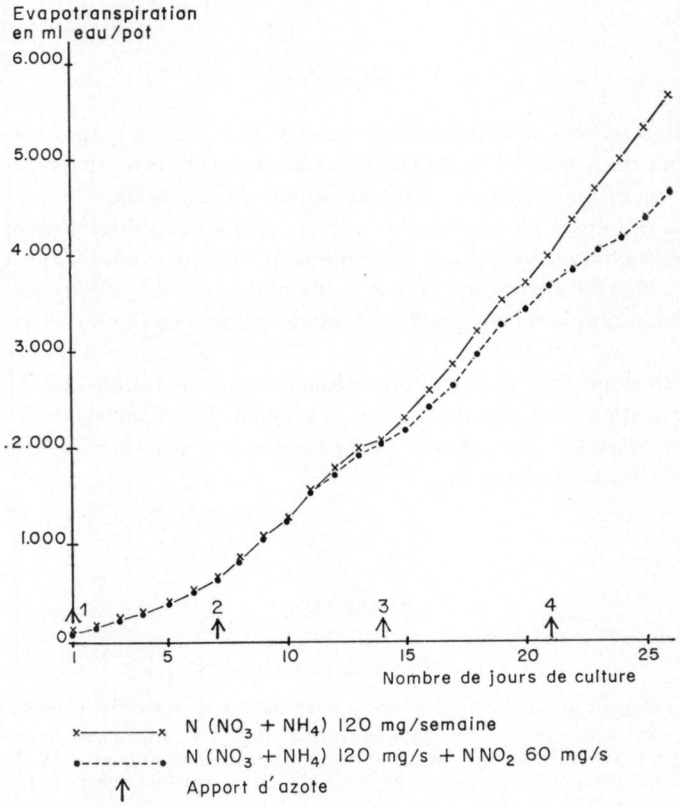


FIG. 5. — *Évapotranspiration cumulée pour les 2 traitements*
traitement 1 : 120 mg d'azote (NO_3 + NH_4) par semaine (témoin)
traitement 2 : 120 mg d'azote (NO_3 + NH_4) par semaine + 60 mg d'azote nitreux par semaine

L'effet dépressif mis en évidence précédemment n'apparaît donc plus lorsque le végétal reçoit une alimentation ammoniaco-nitrique suffisante. Ce fait ne peut pas être rapporté à l'une ou l'autre forme de l'azote minéral fournie à la plante bien que BINGHAM et *al.* (1954) aient observé que l'azote nitrique diminuait la toxicité des nitrites à l'égard des tomates cultivées en solutions nutritives alors que l'azote ammoniacal avait tendance à exercer un effet inverse.

Si on considère les teneurs en azote total du ray-grass et l'évapotranspiration totale pendant la durée de la culture (fig. 4), on constate que l'apport d'une dose

de 60 mg d'azote nitreux par pot et par semaine se traduit par une augmentation de la teneur en azote total (+ 17 p. 100 par rapport au témoin) et par une diminution de la quantité d'eau évapotranspirée (— 17 p. 100 par rapport au témoin). Ce fait indiquerait un début de toxicité. L'existence d'une telle toxicité est également mise en évidence par l'observation de la relation existant entre la croissance de la plante et les quantités d'eau évapotranspirées (LEMAIRE, 1968). En effet, après le troisième apport de nitrites, les courbes se rapportant au lot témoin et au lot traité (60 mg d'azote nitreux par semaine et par pot) commencent à se séparer (fig. 5). L'écart entre les deux lots s'accroît jusqu'à la récolte.

CONCLUSIONS

Les nitrites servent à l'alimentation azotée des plantes quand celles-ci ne disposent pas d'autres sources d'azote et quand les doses d'azote nitreux ne dépassent pas 60 mg/kg sol, ce qui correspondrait à un apport de 210 kg/ha.

Mais pour des doses plus fortes, les nitrites sont susceptibles d'avoir une action toxique. Pour provoquer une chute de rendement de 14 p. 100, il faut apporter des quantités variables de nitrites suivant le mode d'apport : 120 mg/kg sol (420 kg/ha) en une seule fois avant le semis, quatre apports de 24 mg (336 kg/ha) en cours de végétation.

L'action toxique des nitrites diminue lorsque l'alimentation azotée de la plante est assurée principalement par des formes ammoniacales et nitriques ; dans ces conditions, il faut atteindre des apports de 240 mg/kg sol (840 kg/ha) d'azote nitreux pour provoquer un effet toxique.

Reçu pour publication en avril 1969.

SUMMARY

EFFECT OF NITRITES ON PLANTS

In growing rye-grass in small pots in a loamy soil under glass, it has been shown that :

— nitrites can meet the nitrogen requirements of the plant when they represent the only source of nitrogen in the medium and the amounts of nitrous nitrogen do not exceed 60 mg/kg soil

— amounts in excess of 60 mg/kg soil have a toxic effect which is reflected in a sharp fall in, the yield,

— with an identical amount of nitrous nitrogen the toxicity decreases where the nitrogen supply to the plant is provided mainly in the ammoniacal and nitric forms.

ZUSAMMENFASSUNG

EINWIRKUNG VON NITRITEN AUF DIE PFLANZEN

Mittels Raygraskulturen, die in kleinen Gewächsanlagen mit lehmigen Böden und unter Glasdach durchgeführt wurden, wird festgestellt dass :

— die Nitrite sind imstande den Stickstoffbedarf der Pflanze zu erfüllen, wenn sie die einzige Stickstoffquelle des Bödens darstellen und wenn die Dosis an salpeterigem Stickstoff 60 mg pro kg Boden nicht übersteigt ;

— die 60 mg pro kg Boden übersteigende Dosis eine giftige Wirkung hervorruft, die sich durch eine Verminderung der Erträge ausdrückt ;

— für die selbe Dosis an salpeterigem Stickstoff die Giftigkeit nachlässt, wenn die Stickstoffversorgung der Pflanze hauptsächlich durch die ammoniakalischen und salpeterhaltigen Formen erfolgt.

Действие нитритов на растения.

Ф. ЛЕМЭР.

РЕЗЮМЕ

При помощи культур рай-грасса в небольших вегетационных сосудах, на суглинистой почве, под стеклянным прикрытием, автор доказывает следующее :

— когда нитриты являются единственным источником азота в среде и дозы их не превышают 60 мг. на килограмм почвы, они могут полностью удовлетворить потребности растения в этом элементе.

— дозы превышающие 60 мг./кг. почвы оказывают токсическое действие, проявляющееся падением урожайности.

— токсичность одинаковых доз нитритного азота уменьшается, когда азотное питание растений обеспечено исключительно аммониакальными или нитритными формами этого элемента.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BINGHAM F. T., CHAPMAN M. D., PUGH A. L., 1954. Solution culture studies of nitrite toxicity to plants. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **18**, 305-308.

BIRNER H., LUCANUS B., 1866. Wasserkulturversuch mit Hafer. *Landw. Vers. Sta.*, **8**, 128-134.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. Types d'essais pour tester l'efficacité des engrais humiques. *Ann. agron*, **2**, 121-123.

CHAPMAN M. D., LIEBIG G. F., 1952. Field and laboratory studies of nitrite accumulation in soils. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **16**, 276-282.

COURT M. N., STEPHEN R. C., WAID J. S., 1962. Nitrite toxicity arising from the use of urea as a fertilizer. *Nature*, **194**, 1263-1265.

CURTIS D. S., 1949. Nitrite injury on avocado and citrus seedlings in nutrient solution. *Soil Sci.*, **68**, 441-450.

EGGLETON W. G. I., 1935. The uptake of inorganic nitrogenous salts, including sodium nitrite, by the grass plants. *Trans. 3 th intern. Congr. Soil. Sci.*, **1**, 203-204.

FEHER D., VAGI I., 1926. The influence of nitrites on the growth of plants. *Biochem. Ztschr.*, **174**, 262-270.

FRAPS G. S., STERGES A. J., 1930. Occurrence of nitrites in soils. *Tex. agr. exp. Stn. Bull.*, **412**, 1-15.

GRANDEAU L., 1906 : cité par LENGLEN (1947).

GREAVES J. E., STEWART R., HIRST T. C., 1917. Nitrous nitrogen in irrigated soils. *Soil Sci.*, **3**, 149-154.

JUSTICE I. K., SMITH R. L., 1962. Nitrification of ammonium sulfate in calcareous soil as influenced by combinations of moisture, temperature and levels of added nitrogen. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **26**, 246-250.

LEMAIRE F., 1968. Contribution à l'étude des relations entre croissance et évapotranspiration. *C. R. Acad. Agric.*, **54**, 13, 1056-1063.

LENGLEN M., 1947. Sur les possibilités d'emploi de nitrites alcalins comme engrais. *C. R. Acad. Agric.*, **33**, 404-407.

LOMBARD M., 1913. Une méthode pratique de dosage des nitrites dans les eaux potables. *Bull. Soc. chim. Fr.*, **13**, 304-309.

METZGER W. H., JANSSEN G., 1928. The relation of sodium nitrate and certain other nitrogen carriers to the development of chlorosis in rice. *J. agric. Res.*, **37**, 589-602.

MEVIUS W., DIKUSSAR I., 1930. Nitrite als Stickstoffquellen für höhere Pflanzen. Ein Beitrag zur Frage der Assimilation des Nitratsstickstoffes. *Jahrb. Wiss. Bot.*, **73**, 633-703.

NOWAKOWSKI T. Z., CUNNINGHAM R. K., NIELSEN K. F., 1965. Nitrogen fractions and soluble carbohydrates in *Italian rye grass*. I. Effects of soil temperature, form and level of nitrogen. *J. Sci. Food Agric.*, **16**, 124-134.

NOWAKOWSKI T. Z., CUNNINGHAM R. K., 1966. Nitrogen fractions and soluble carbohydrates in *Italian rye grass*. II. Effects of light intensity, form and level of nitrogen. *J. Sci. Food Agric.*, **17**, 145-150.

OKE O. L., 1966. Nitrite toxicity to plants. *Nature*, **212**, 528.

OSAWA T., LORENZ O. A., 1968. Effect of nitrite and P levels in nutrient solution on growth of vegetable crops. *Proc. amer. Soc. hortic. Sci.*, **92**, 595-602.

PERCIABOSCO P., ROSSO U., 1909. L'absorbimento diretto dei nitriti nelle piante. *Staz. Sper. Agr. Ital.*, **42**, 5.

PAUL J. L., POLLE E., 1965. Nitrite accumulation related to lettuce growth in a slightly alkaline soil. *Soil Sci.*, **100**, 292-297.

SCHLOESING Th., 1905. Nitrates et nitrites pour engrais. *C. R. Acad. Sci.*, **141**, 745-746.

SCHULTZ M., 1903. *Studien über den Einfluss von Nitriten auf die Keimung von Samen und auf Wachstum von Pflanzen*. Königsberg. (Diss).

STUTZER A., 1906. Die Wirkung von Nitrit auf Pflanzen. *Jahrb. Landw.*, **54**, 125-138.

TYLER K. B., BROADBENT F. E., HILL G. N., 1959. Low temperature effects on nitrification in four California soils. *Soil Sci.*, **87**, 123-129.

VAN DEN HENDE A., 1950. Some effects of nitrite application to field crops. *Plant and Soil*, **2**, 223-230.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques. etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes : *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... . — *le nom de l'établissement* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *Références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals,* ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in ».

La mention de « communication personnelle » ou « données non publiées » etc, doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffre arabe visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve corriger.

Envoi du manuscrit : M. HENIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles (France) On demande deux exemplaires.

Le Directeur de la publication: M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 9-1969

Dépôt légal: 3e trimestre 1969. N° d'impression: 1116.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 20 1969 NUMÉRO 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des sommaires et résumés

Ann. agron., 1969, **20** (4), 333-359.

MESURE DES SURFACES SPÉCIFIQUES DES ARGILES PAR ADSORPTION

J. GUYOT
avec la collaboration technique de Huguette ANTOINE

Station agronomique, 36 - Châteauroux
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Afin de pallier les difficultés rencontrées dans la mesure des aires des surfaces des argiles à partir de leurs dimensions, on fait appel à des méthodes de détermination basées sur les phénomènes d'adsorption.

Les principales techniques impliquant l'adsorption de molécules non polaires (azote-butane) permettant de caractériser les surfaces externes, et de molécules polaires (éthylène-glycol) pour la mesure des surfaces internes et totales, ont été décrites. Leur précision et leur spécificité sont discutées.

On a souligné, par ailleurs, l'influence de la nature des cations échangeables sur l'aire des surfaces des argiles. Cette dernière varie en fonction de l'énergie de rétention du cation compensateur, vis-à-vis des molécules polaires.

La présence de matière organique liée à l'argile est une cause de perturbation dans la mesure des surfaces spécifiques. On a montré l'évolution des aires de ces surfaces en fonction du taux de matière organique.

INTRODUCTION

La connaissance de l'aire des surfaces des particules solides du sol, et principalement des argiles, est un élément important de la compréhension éventuelle des phénomènes qui prennent naissance à l'interface « minéral-milieu extérieur ». Ce sont les particules les plus fines du sol qui jouent le plus grand rôle en développant des surfaces parfois très grandes.

Or, la granulométrie classique n'apporte des données que sur l'évaluation des surfaces externes des constituants et, à condition, de surcroît, que les surfaces soient bien définies, ce qui n'est pas le cas pour les particules de très petites dimensions.

On la caractérise habituellement par la capacité d'échange des cations, mais elle peut l'être également par la surface spécifique, les deux valeurs permettant, par ailleurs, d'atteindre la densité de charge.

Définitions

La surface spécifique peut être définie comme étant l'aire de la surface d'une unité de masse d'un matériau pulvérulent ou poreux.

Dans le cas des argiles, elle est exprimée en m^2 et représente la somme des surfaces des particules $< 2\ \mu$ contenues dans 1 g d'argile. Par conséquent, la surface spécifique d'un gramme d'argile dépend du nombre de particules, lui-même fonction de la dimension de ces particules ; on sait, en effet, que l'aire de la surface augmente au fur et à mesure que la taille des particules diminue (JACKSON, 1956).

La surface spécifique d'une particule d'argile correspond à la somme de deux surfaces nettement définies : la surface externe et la surface interne (uniquement pour les minéraux gonflants ou à canalicules).

La surface externe comprend les surfaces basales, c'est-à-dire celles des plans supérieurs et inférieurs de chaque cristallite et les surfaces latérales (bords de chaque cristallite).

L'aire des surfaces latérales est généralement inférieure à celle des surfaces basales.

RAMAN et MORTLAND (1966) ont montré l'influence du rapport largeur/épaisseur des particules sur l'aire des surfaces externes (tabl. 1). Cette dernière est d'autant plus élevée, que le rapport précité est plus grand. L'augmentation de ce rapport a, en effet, pour conséquence, un accroissement corrélatif du nombre des particules pour un poids donné.

La surface externe représente la surface spécifique des particules de constituants 1/1, 2/1 et 2/2 non altérés (kaolinite, mica, illite, chlorite).

Par contre, il n'en est pas de même pour les autres minéraux argileux qui, lorsqu'ils sont saturés avec des liquides polaires (H_2O, alcools, glycols), permettent, par suite de leur structure, à une fraction plus ou moins importante de ces liquides, de pénétrer dans certains espaces définis et de recouvrir ainsi une surface parfois très étendue qui est appelée surface interne.

La surface interne peut être observée pour deux types particuliers de minéraux :

1. les minéraux « gonflants » du type montmorillonite, vermiculite dont le contact avec certaines molécules, provoque l'écartement des feuillets, nécessaire à la pénétration de ces molécules.

La surface interne correspond, dans ce cas, à la surface développée par les deux faces opposées de chaque interfeuillet de ces constituants. Elle est environ 10 fois supérieure à la surface externe pour une montmorillonite.

2. Les minéraux du type sépiolite, palygorskite, à structure fibreuse, comportant un certain nombre de canalicules dans lesquels peuvent s'introduire les molécules polaires et même les molécules neutres dans certaines conditions, lorsque leur diamètre est inférieur à celui des canalicules.

La surface interne est alors définie par l'aire de la surface des parois internes de ces canalicules.

A partir des données structurales (dimensions de la maille élémentaire), il est possible de calculer la surface spécifique théorique des constituants argileux (tabl. 2). De même, l'aire de la surface des particules argileuses peut être également déter-

TABLEAU I

Influence du rapport largeur/épaisseur des particules d'argile sur l'aire des surfaces spécifiques (m^2/g) (RAMAN et MORTLAND, 1966)

Dimension des particules (en microns)	Rapport largeur/épaisseur		
	10 : 1	20 : 1	50 : 1
50	0,08	0,12	0,20
20	0,20	0,29	0,51
5	0,80	1,17	2,03
2	2,01	2,93	5,08
1	4,01	5,87	10,17
0,1	40,08	58,64	101,63

TABLEAU 2

Calcul de la surface spécifique externe théorique d'une montmorillonite et d'une kaolinite

N. B. — Ces calculs sont effectués à partir de considérations minéralogiques et ne tiennent pas compte des surfaces latérales, souvent négligeables.

Montmorillonite ($4\ SiO_2Al_2O_3\ H_2O$) (MAMY).

Particules de 0,5 μ de diamètre moyen et de 100 Å d'épaisseur = 10 feuillets de 10 Å d'épaisseur.

$a = 5{,}3$ Å $\qquad b = 9{,}05$ Å $\qquad$ Masse moléculaire = 720

Surface basale de la maille :

$$(5{,}3 \times 9{,}05) \times 2 = 96\ Å^2$$

Surface basale totale calculée pour 1 gramme de montmorillonite :

$$S = \frac{6{,}02 \times 10^{23} \times 10^{-20} \times 96}{720} = 800\ m^2/g$$

Surface basale externe calculée (par plaquette de 10 feuillets) :

$$\frac{800}{10} = 80\ m^2/g$$

Kaolinite ($2\ SiO_2Al_2O_3\ 2H_2O$).

Particules de 1 μ de diamètre moyen et de 0,05 μ d'épaisseur = 500 Å (GRIM) = 71 feuillets de 7 Å d'épaisseur.

$a = 5{,}14$ Å $\qquad b = 8{,}93$ Å $\qquad$ Masse moléculaire = 516

Surface basale de la maille :

$$(5{,}14 \times 8{,}93) \times 2 = 91{,}8\ Å^2$$

Si les surfaces basales de chaque feuillet étaient accessibles (ce qui n'est pas le cas pour la kaolinite dont les feuillets sont liés entre eux par les forces de Van der Waals et les liaisons hydrogène), la surface totale serait de :

$$S = \frac{6{,}02 \times 10^{23} \times 10^{-20} \times 91{,}8}{516} = 1\,071\ m^2/g$$

La surface basale externe calculée en tenant compte du nombre de feuillet par cristallite est de :

$$\frac{1\,071}{71} = 15\ m^2/g$$

minée, directement, en tenant compte de leur taille et en assimilant la particule élémentaire à un volume simple, généralement une sphère ou un cube.

Toutefois, cette méthode directe, utilisée principalement pour mesurer les surfaces des particules des sables et des limons, reste d'une application très limitée en ce qui concerne les particules très fines, car elle nécessite la connaissance, à la fois de la forme de référence (sphère, cube, parallélipipède) et des dimensions exactes qui lui correspondent. Il est également primordial, dans ce cas, de bien connaître la distribution des particules de différentes tailles dans un poids P donné, afin de calculer l'aire de leurs surfaces par simple proportionnalité.

Tous ces éléments étant très difficiles à définir, particulièrement pour les argiles, on a recours, de préférence, aux méthodes indirectes de mesures des surfaces, basées sur les phénomènes d'adsorption.

L'objet de ce mémoire est de décrire les principales méthodes utilisant les phénomènes d'adsorption ou de désorption, de discuter leur précision et leur spécificité, et de montrer l'incidence éventuelle de certains facteurs sur la mesure des aires des surfaces des argiles.

MÉTHODES DE MESURE DES SURFACES PAR ADSORPTION

1. *Principes généraux et calculs*

Par suite des difficultés rencontrées dans l'utilisation des méthodes directes pour mesurer les surfaces des particules les plus fines du sol, de nombreux chercheurs ont été conduits à étudier d'autres techniques, notamment celles fondées sur l'adsorption des molécules, par les surfaces des solides.

Il faut distinguer deux types d'adsorption :

1. *L'adsorption physique* de molécules non polaires (N_2, C_4H_{10}, C_2H_6, O_2, CO_2, etc), liées à la surface des particules par les forces de VAN DER WAALS. Il convient, toutefois, de signaler que parmi ces molécules, certains gaz rares, comme l'hélium, ne sont pas retenus par les surfaces. On verra plus loin que cette propriété est d'ailleurs exploitée au cours des mesures expérimentales. Ce type d'adsorption ne permet pas de caractériser le solide, mais contribue à la détermination de l'aire des surfaces externes.

2. *L'adsorption chimique* où il y a réaction entre les molécules polaires (H_2O, alcools, glycols) et la surface des particules chargée négativement. Elle a une grande importance pour la caractérisation de l'interface, car elle permet de mesurer les surfaces internes.

Le but des diverses méthodes utilisées est de rechercher pour un poids P d'argile, la quantité de liquide ou le volume de gaz réparti sur la surface en une couche monomoléculaire.

On obtient alors l'aire de la surface en multipliant cette quantité (en mg/g d'argile) ou ce volume (en cm^3/g d'argile) d'absorbat par la valeur de l'encombrement spécifique, c'est-à-dire de la surface recouverte par 1 mg ou 1 cm^3 de l'adsorbat.

Cet encombrement est déterminé à partir de la valeur σ_m, exprimée en Å², et qui correspond à la surface recouverte par la molécule de l'adsorbat employé.

La valeur σ_m peut être calculée, soit à partir de la formule suivante (cas de molécules sensiblement sphériques N_2) (YOUNG et CROWELL, 1962) :

$$\sigma_m = 3{,}464 \left[\frac{M}{4\sqrt{2}\, N\, \delta_1} \right]^{2/3}$$

dans laquelle M est le poids moléculaire de l'adsorbat, δ_1 la densité en phase liquide et N le nombre d'Avogadro, soit en tenant compte des valeurs des rayons covalents de VAN DER WAALS et des distances interatomiques (PAULING, 1960) (cas de molécules de forme allongée (C_4H_{10}, alcools, etc)).

Nous venons de souligner brièvement le rôle prépondérant joué par l'adsorption physique et l'adsorption chimique dans la détermination des surfaces spécifiques des argiles, et nous nous proposons maintenant d'étudier plus en détail les techniques couramment employées, fondées sur ces deux types d'adsorption.

2. *Méthodes de mesure des surfaces par adsorption physique*

a) *Caractères généraux de l'adsorption physique.*

Nous avons déjà indiqué que, pour ce type d'adsorption, il y a interaction entre les molécules non polaires et la surface des particules argileuses (forces de VAN DER WAALS).

Ce sont principalement les surfaces externes qui fixent ces molécules, car celles-ci ne peuvent, en effet, pénétrer dans les espaces interfoliaires, générateurs de surfaces internes, caractéristiques des minéraux à réseaux expansibles. Par suite de leur absence de polarité, ces molécules neutres sont en effet dans l'impossibilité, soit de provoquer un écartement des feuillets, contrairement aux molécules polaires, soit de se substituer aux molécules polaires, et notamment H_2O, qui peuvent être présentes dans l'interfeuillet.

Par contre, si l'on chasse, grâce à un chauffage suffisant, l'eau zéolitique fortement retenue dans les canalicules des minéraux à structure fibreuse, les molécules neutres peuvent s'y introduire et se disposer sur les surfaces internes de ces canalicules, à condition toutefois que le diamètre de ceux-ci soit supérieur à celui des molécules (GUYOT et DEJOU, 1966).

Pour une utilisation rationnelle des méthodes, basées sur l'adsorption physique, en vue de la détermination de l'aire des surfaces, il était nécessaire de connaître les conditions favorisant la fixation d'une couche monomoléculaire d'adsorbat à la surface des argiles.

C'est pourquoi, de nombreux chercheurs tentèrent de résoudre ce problème en construisant les isothermes d'adsorption de diverses molécules non polaires, à partir desquels ils pourraient déterminer, dans des conditions standard, le volume de gaz (V_m) susceptibles de se répartir à la surface des argiles en une couche monomoléculaire.

b) *Calcul de V_m. Équation B. E. T.*

C'est par l'étude de ces isothermes d'adsorption, dont nous donnerons plus loin quelques exemples, que BRUNAUER, EMMETT et TELLER (1938), purent définir les conditions dans lesquelles pouvait se former cette couche monomoléculaire.

En se référant à leurs données expérimentales et en appliquant le raisonnement de LANGMUIR, à l'adsorption plurimoléculaire, ils purent dégager une relation générale entre le volume de gaz adsorbé V et la pression P, conduisant à une équation fondamentale, permettant de calculer le volume de gaz (V_m) (fixé à 0°C sous 760 mm Hg), nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire la surface d'un matériau pulvérulent ou poreux.

Cette équation B. E. T. s'établit ainsi :

$$V = \frac{V_m \, c \, P}{(P_0 - P)\left(1 + (c - 1)\frac{P}{P_0}\right)}$$

qui peut également s'écrire sous la forme :

$$\frac{P}{V\,(P_0 - P)} = \frac{1}{c\,V_m} + \frac{(c-1)}{c\,V_m} \cdot \frac{P}{P_0}$$

Dans cette relation :

P_0 : désigne la pression de vapeur saturante du gaz non polaire à la température de l'isotherme,

V : volume de gaz adsorbé à la pression d'équilibre P,

V_m : volume de gaz (exprimé en cm^3/g à 0°C sous 760 mm Hg) contenant le nombre de molécules nécessaires pour couvrir l'adsorbant d'une seule couche moléculaire,

c : est une constante, fonction de la chaleur d'adsorption de la première couche de gaz et de la chaleur de liquéfaction de l'adsorbat (EMSCHWILLER, 1961).

Si l'on porte en ordonnée $\frac{P}{V\,(P_0 - P)}$ et en abscisse $\frac{P}{P_0}$ (pression relative), on obtient une droite dont la pente a pour valeur $\frac{c-1}{c\,V_m}$ et l'ordonnée à l'origine $I = \frac{1}{c\,V_m}$.

$$\text{La pente } p = \frac{c-1}{c\,V_m} = \frac{c}{c\,V_m} - \frac{1}{c\,V_m} = \frac{1}{V_m} - \frac{1}{c\,V_m}$$

$$\text{Or } \frac{1}{c\,V_m} = I \text{ . Donc } p = \frac{1}{V_m} - I \text{ et } \frac{1}{V_m} = p + I$$

$$V_m = \frac{1}{p + I}$$

L'équation de B. E. T. ne peut être appliquée que pour des valeurs de $\frac{P}{P_0}$ comprises entre 0,05 et 0,35.

c) *Méthodes de mesure de V_m.*

Deux méthodes de mesure de V_m sont actuellement utilisées : l'une volumétrique, classique ; l'autre dynamique, donnant des résultats plus rapidement.

L'une et l'autre consistent à déterminer l'isotherme d'adsorption du gaz utilisé. Cette courbe, de forme sigmoïdale, représente le volume de gaz (en cm^3/g) adsorbé par l'argile pour une pression d'équilibre donnée. La figure 1 représente les isothermes d'adsorption de l'azote à — 196°C pour une montmorillonite de Camp-Berteaux, une illite (origine inconnue) et une sépiolite de Salinelles.

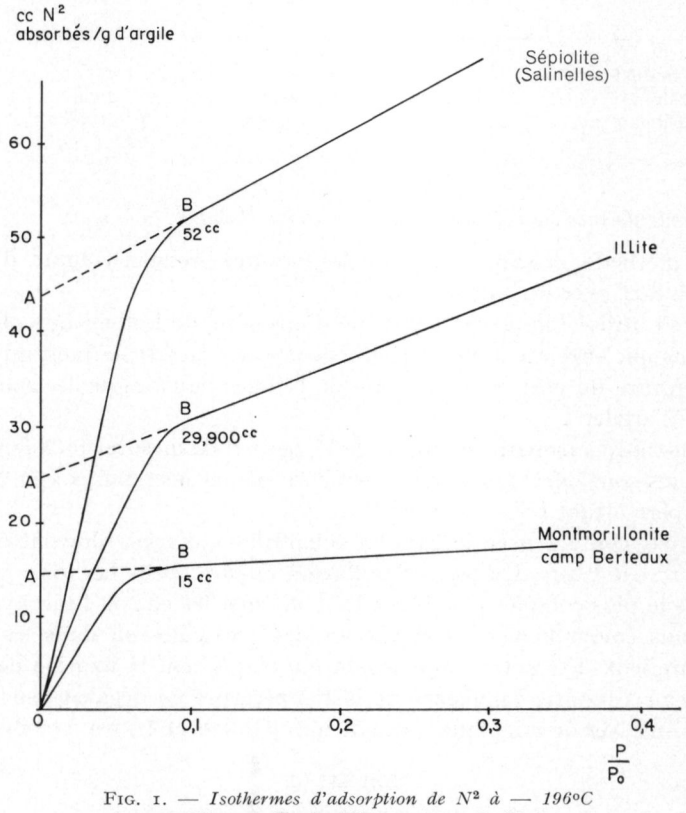


FIG. 1. — *Isothermes d'adsorption de N^2 à — 196°C sur Montmorillonite-Illite-Sépiolite. Point B*

La portion linéaire de tous ces isothermes, quand on l'extrapole à $\frac{P}{P_0} = O$, intercepte l'ordonnée au point A.

BRUNAUER et EMMETT (1935) estimaient que cette portion linéaire correspondait à l'édification d'une deuxième couche moléculaire et que l'ordonnée à l'origine A, indiquait le volume exigé pour obtenir une seule couche moléculaire.

Toutefois, après avoir considéré plusieurs points sur cette portion linéaire de l'isotherme d'adsorption, ils constataient que le point B semblait le mieux correspondre à la valeur V_m, ce qui fut d'ailleurs confirmé un peu plus tard en étudiant les chaleurs d'adsorption.

D'ailleurs, cette méthode de détermination fut abandonnée, dès l'application de l'équation fondamentale B. E. T.

Les valeurs de V_m, données par le point B pour les isothermes d'adsorption de la figure 1, sont presque identiques à celles obtenues à partir de l'équation B. E. T., comme le montre le tableau ci-dessous :

Minéraux argileux	V_m (en cc/g)	
	Point B	B. E. T.
Montmorillonite	15	14,5
Illite.....	29,9	29,9
Sépiolite	52,0	52,78

α. *Méthode de mesure volumétrique en système statique.*

C'est la méthode classique, basée sur les mesures pression-volume, d'un gaz non polaire en contact avec un corps solide.

L'appareil utilisé (fig. 2) est constitué d'une série de bulbes, de volume connu, contenus dans une enceinte à circulation d'eau (*water-jacket*) permettant le contrôle de la température du gaz, et d'une série de cellules dans lesquelles sont placés les échantillons d'argile.

Un manomètre à mercure, en forme de U, permet de mesurer P en fonction de V ; quatre mesures sont effectuées pour obtenir les points nécessaires à la construction de la droite permettant l'obtention de V_m.

Avant tout contact avec le gaz, les échantillons d'argile doivent être dégazés sous vide à $1 \cdot 10^{-5}$ torr. Un léger chauffage à 60-70°C peut favoriser ce dégazage, qui doit être le plus complet possible, afin d'éliminer les gaz ou l'eau hygroscopique parfois retenus énergiquement à la surface des particules ou dans les canalicules (minéraux argileux à structure fibreuse) et qui empêchent la fixation de l'adsorbat.

Le tableau 3 montre l'influence de la température de dégazage sur les valeurs des aires des surfaces de minéraux à canalicules (GUYOT et DEJOU, 1966).

TABLEAU 3

Influence de la température de dégazage sur les valeurs des aires de surfaces de minéraux à canalicules
(Adsorption de C_4H_{10})

Traitement appliqué	Attapulgite de Mormoiron (Vaucluse)		Sépiolite de Salinelles		Sépiolite de Valleca (Espagne)	
	V_m (cm^3/g)	Surface externe (m^2/g)	V_m (cm^3/g)	Surface externe (m^2/g)	V_m (cm^3/g)	Surface externe (m^2/g)
Dégazage à t^o ambiante voisine de 20°C.....	10,5	124	17	200,7	1,2	14,2
Dégazage à 110°C	15,6	184,4	19,5	229,6	14,5	171
Dégazage à 160°C	16,7	198	23,25	274	14,5	171
Dégazage à 250°C	—	—	—	—	16,8	198

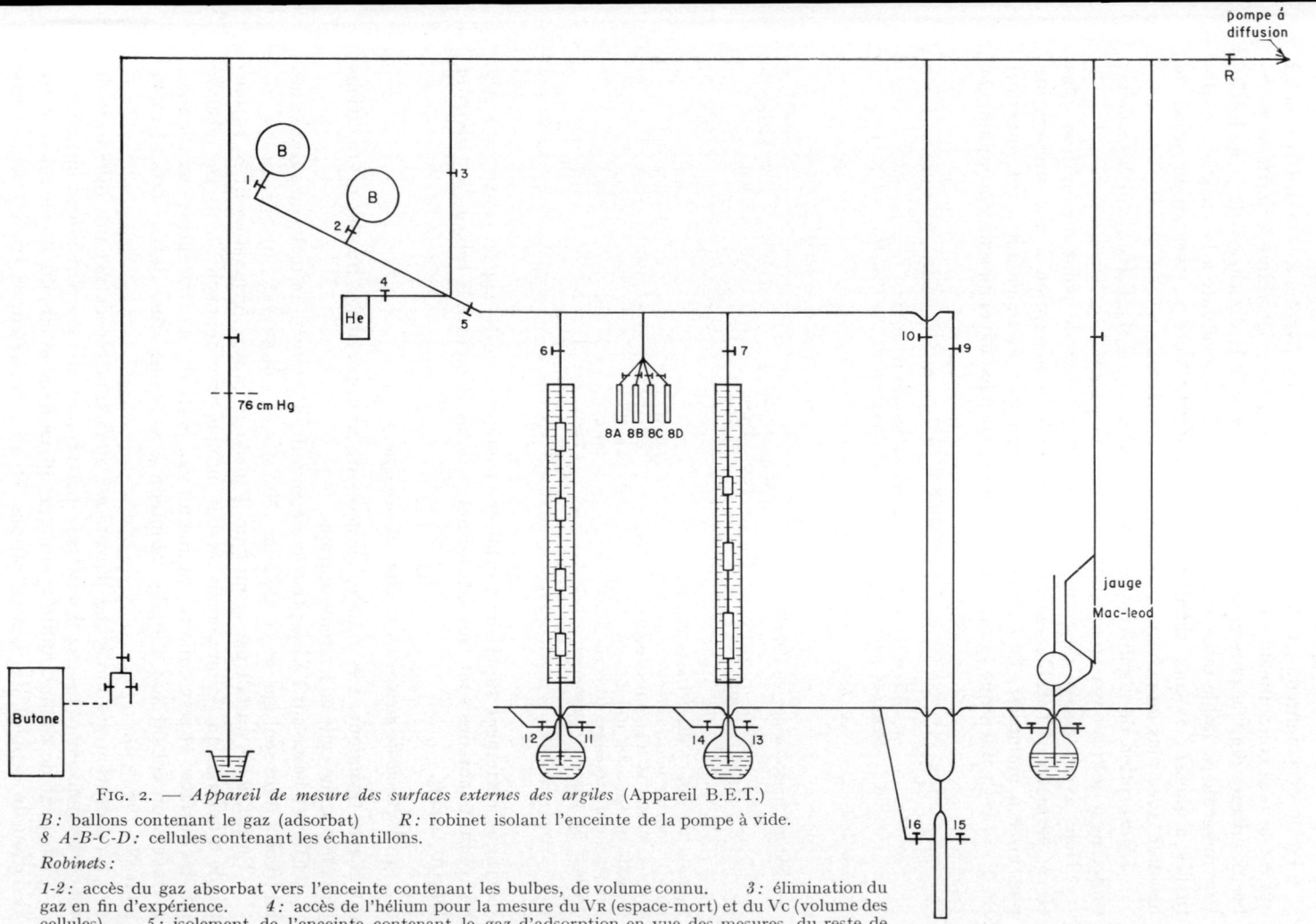


FIG. 2. — *Appareil de mesure des surfaces externes des argiles* (Appareil B.E.T.)

B : ballons contenant le gaz (adsorbat) *R :* robinet isolant l'enceinte de la pompe à vide.
8 A-B-C-D : cellules contenant les échantillons.

Robinets :

1-2 : accès du gaz absorbat vers l'enceinte contenant les bulbes, de volume connu. *3 :* élimination du gaz en fin d'expérience. *4 :* accès de l'hélium pour la mesure du V_R (espace-mort) et du Vc (volume des cellules). *5 :* isolement de l'enceinte contenant le gaz d'adsorption en vue des mesures, du reste de l'enceinte générale. *6-7 :* accès du gaz vers les bulbes contenus dans le water-jacket. *9-10* : accès du gaz dans le manomètre à mercure (mesure de P). *11-12-13-14 :* robinets permettant de régler le niveau du mercure dans les bulbes (mesure de V). *15-16 :* robinets régulateurs du niveau du mercure dans le manomètre (mesure de P en fonction de V).

Parmi de nombreux gaz à molécules non polaires, l'azote, à — 196°C, est celui qui est le plus couramment utilisé. Le choix du gaz est déterminé à partir de nombreux critères dont le plus important est évidemment la dimension de la molécule. Une molécule de faible taille aura une plus grande accessibilité à la surface des particules argileuses et aux canalicules des minéraux fibreux, permettant ainsi de mesurer, avec plus de précision, les aires de ces surfaces.

L'adsorption de nombreux gaz (N_2, Kr, CO_2, O_2, C_2H_6, C_2H_2...) sur les solides, s'effectue à de très basses températures (— 78 à — 196°C).

Nous avons essayé de travailler avec un gaz dont le point d'ébullition, plus élevé, permettrait l'établissement d'un isotherme d'adsorption à une température plus aisée à maintenir. Le butane C_4H_{10} — très pur — répondait à cet impératif (P. E. = 0°C). Bien que la molécule de forme allongée développe un encombrement

TABLEAU 4

Aires des surfaces externes de minéraux argileux obtenus à partir des isothermes d'adsorption de N_2 et C_4H_{10}

Nature minéralogique de l'argile	Surface externe en m^2/g	
	Adsorption de N_2 à — 196°C	Adsorption de C_4H_{10} à 0°C
Kaolinite de Saint-Yrieix (Haute-Vienne)	47	46,4
Illite H (origine indéterminée)	130,4	130,1
Montmorillonite H (Camp-Berteaux)	63,1	63,3
Sépiolite de Salinelles (Gard)	230,2	229,6
Attapulgite d'Attapulgus (Georgie-U.S.A.)	181,6	216,9
Argile à Allophane (Guadeloupe)	173,9	181,2

spécifique nettement supérieur à celui de la molécule de N_2 (44 $Å^2$ contre 16,2 $Å^2$), les résultats obtenus sont très satisfaisants comme le montre le tableau 4 (GUYOT et DEJOU, 1966).

β. *Méthode de mesure en système dynamique.*

Cette technique, très rapide, ne nécessite ni appareillage fragile, ni conditions de vide comme celle en système statique.

Elle est basée sur l'adsorption préférentielle, à partir d'un mélange gazeux, des molécules d'un seul gaz de ce mélange (NELSEN et EGGERTSEN, 1958).

En pratique, on fait passer un flux de mélange gazeux (généralement N_2 accompagné d'hélium, qui, comme nous l'avons indiqué précédemment, n'est pas adsorbé par les surfaces et se comporte comme un gaz porteur), de concentrations connues, à travers un échantillon d'argile, maintenu à la température de l'adsorbat (-196°C pour N_2) (fig. 3 *a*).

L'adsorption des molécules d'azote est alors caractérisée par une différence de concentrations entre les gaz du mélange par rapport aux concentrations initiales.

Un pont de conductibilité thermique, placé dans le circuit, décèle, alors, cette variation du rapport des concentrations, et un enregistreur la traduit sous forme

d'un pic (fig. 3 *b*) dont la surface est proportionnelle au volume de gaz adsorbé. Ce volume est alors déterminé, en calibrant la surface du pic, par comparaison avec celles obtenues à partir de volumes connus de gaz adsorbé.

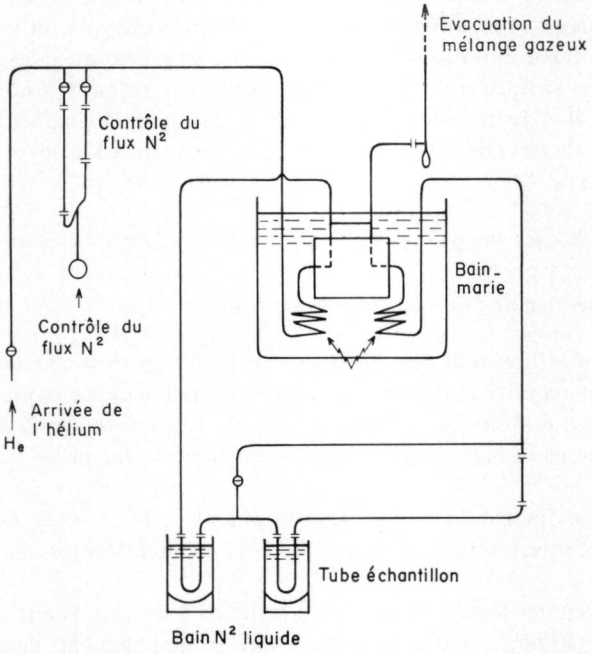


FIG 3 *a*. — *Appareil de mesure de surfaces externes à flux continu*

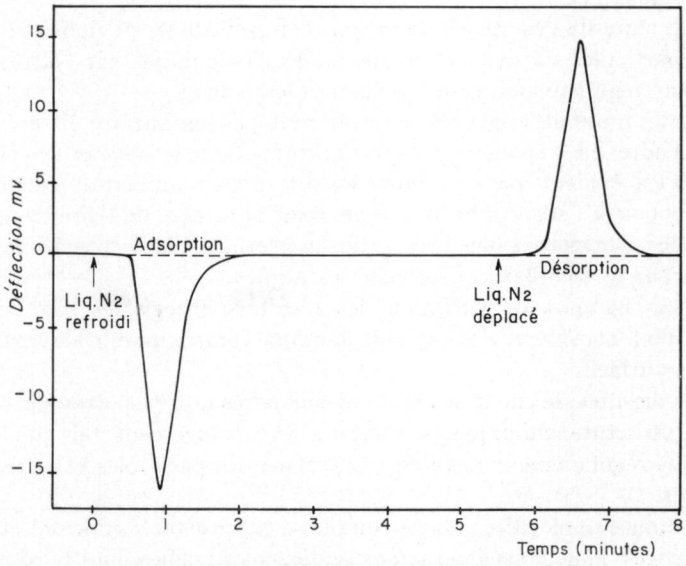


FIG 3 *b*. — *Courbe d'adsorption et de désorption de* N_2 *sur catalyseur de cracking.* S = 101 m^2/g

Plusieurs opérations, sous pression partielle du mélange gazeux comprise entre 0,05 et 0,35, sont nécessaires pour calculer V_m à partir de l'équation B. E. T.

Ces méthodes, appliquées en système statique ou dynamique, si elles permettent de définir la surface spécifique de certains constituants argileux (kaolinite, mica) et des minéraux fibreux, après départ complet de l'eau zéolitique, ne caractérisent, par contre, que la surface externe des minéraux à réseaux expansibles. Or, nous avons montré que cette surface est souvent très faible par rapport à la surface interne. C'est pourquoi, il s'avère nécessaire, pour déterminer la surface spécifique (externe + interne) de ces constituants argileux de recourir à l'adsorption chimique.

3. *Méthodes de mesure des surfaces par adsorption chimique*

a) *Caractères généraux de l'adsorption chimique.*

Si les molécules non polaires adsorbées en phase gazeuse présentent l'avantage d'un arrangement régulier et défini à la surface des particules lorsque l'on opère dans des conditions bien établies de température et de pression relative, elles ont l'inconvénient, comme nous l'avons déjà signalé, de ne pouvoir écarter les feuillets des minéraux gonflants.

Par contre, les molécules polaires, notamment celles à forte polarité, peuvent pénétrer dans les interfeuillets et se fixer sur la surface interne : c'est l'adsorption chimique.

Elle met en jeu des forces supérieures à celles de VAN DER WAALS. Il s'établit une sorte de liaison chimique entre la surface (et principalement la surface interne) chargée négativement par suite de substitutions isomorphiques, intéressant les couches tétraédriques et octaédriques, et les molécules polaires, par l'intermédiaire de leurs pôles positifs.

Mais, par suite de l'existence de cations compensateurs de déficit de charge à la surface des particules, la disposition des molécules polaires sur cette surface peut paraître moins régulière que celle des molécules neutres.

En effet, les molécules polaires ne recouvrent pas une surface lisse et homogène, mais, au contraire, elles épousent à la fois la forme de la surface et des cations qui la ponctuent. Il est évident que ce comportement apporte un certain élément d'imprécision, par rapport à l'adsorption physique, dans la mesure de l'aire des surfaces qui, comme nous le constaterons plus loin, varie, en effet, avec la nature des cations échangeables saturant le complexe adsorbant des argiles.

Malgré ces facteurs de variation, les résultats enregistrés sont suffisamment satisfaisants pour considérer l'adsorption chimique comme un moyen valable de détermination des surfaces.

Pour ces mesures, le choix des molécules polaires doit se porter sur celles dont la forme et la structure chimique permettent un arrangement tel qu'elles puissent s'étaler le plus régulièrement possible à la surface des particules et y être énergiquement retenues.

De nombreuses molécules polaires, en phase gazeuse ou liquide ont été employées pour ces mesures, mais nous évoquerons seulement ici celles dont le rôle nous paraît le plus important.

Quelques chercheurs ont essayé de déterminer l'aire des surfaces en utilisant des molécules polaires à l'état gazeux, par extrapolation des techniques fondées sur l'adsorption de molécules non polaires.

b) *Adsorption de molécules polaires à l'état gazeux.*

Parmi les molécules polaires à l'état gazeux dont l'adsorption sur les surfaces des argiles fut le plus étudiée, il faut citer notamment la vapeur d'eau H_2O ($\sigma m = 10{,}8$ Å^2).

J. P. QUIRK (1955), en comparant les valeurs de V_m obtenues à partir des isothermes d'adsorption de N_2 et de vapeur d'H_2O, nota que la couche monomoléculaire d'H_2O semblait se former à une pression relative $\#$ 0,20 pour les kaolinites.

Toutefois, pour les autres minéraux argileux, notamment ceux à réseaux expansibles, les résultats obtenus n'étaient pas concordants. Par suite de leur polarité, les molécules d'eau sont adsorbées sur la surface externe, mais également sur une partie de la surface interne. La surface totale obtenue reste toutefois inférieure à celle rencontrée habituellement et définie par calcul. Cette différence serait due à un arrangement plus ou moins ordonné des molécules d'H_2O sur la surface, avec concentration autour des sites d'adsorption des cations.

FARRAR (1963) préconisa également d'utiliser la vapeur d'eau pour mesurer la surface totale des particules du sol à partir de l'équation B. E. T. modifiée (le facteur de pression relative étant remplacé, dans ce cas, par celui d'humidité relative où $H = 100 \frac{P}{P_0}$):

$$\frac{H}{M(100 - H)} = \frac{1}{M_m c} + \frac{c - 1}{M_m c} \times \frac{H}{100}$$

M : teneur en eau du sol ou de l'argile pour une humidité relative H où $5 < H < 35$,

M_m : teneur en eau lorsque la surface des particules est couverte par une couche monomoléculaire d'eau,

c : constante fonction de l'état de la première couche monomoléculaire d'eau et de la surface des particules des sols.

En portant en ordonnée $\frac{H}{M(100 - H)}$ et en abscisse $\frac{H}{100}$, l'ordonnée à l'origine donne $\frac{1}{M_m c}$ et la pente est égale à $\left(\frac{c - 1}{M_m c}\right)$. On en déduit M_m. La surface externe des particules est alors calculée à partir de l'équation d'ANDERSON, modifiée :

$$M = \frac{(M_m)e}{1 - \frac{ke\ H}{100}} + M_i \qquad \text{pour } 50 < H < 80$$

ke : constante de correction de la chaleur d'évaporation des couches moléculaires d'eau, autre que la première couche ; elle est inférieure à l'unité,

M_i : teneur en eau sur la surface interne, pour H élevée,

$(M_m)e$: teneur en eau égale à une couche monomoléculaire sur la surface externe.

On porte en ordonnée M et en abscisse $1/(1 - ke \frac{H}{100})$. L'ordonnée à l'origine est Mi et la pente $(M_m)e$.

Des différences encore sensibles (50 p. 100) sont enregistrées entre les valeurs des aires des surfaces de particules, déterminées par cette technique et celle par adsorption de N_2.

En ce qui concerne les aires des surfaces totales des minéraux argileux, on constate que les valeurs obtenues, pour les minéraux non expansibles, sont encore inférieures à celles rencontrées habituellement (491 m^2/g contre 800 m^2/g pour une montmorillonite).

L'utilisation de la vapeur d'eau, comme adsorbat, conduisant à des résultats aléatoires, du moins en ce qui concerne les mesures de l'aire des surfaces, il est le plus souvent fait appel à des molécules organiques en phase liquide.

c) *Adsorption de molécules polaires à l'état liquide.*

L'adsorption de molécules polaires de liquides organiques sur les surfaces des argiles a été étudiée en détail par Bradley (1945) et Mac Ewan (1948).

α. *Adsorption de molécules d'alcools.*

Ces auteurs avaient constaté que, parmi les monoalcools à chaîne droite, seuls CH_3OH et C_2H_5OH pouvaient former deux couches monomoléculaires dans l'espace interfoliaire de la montmorillonite, et une seule dans celui de l'halloysite.

Barshad (1954), Glaeser (1954), Brindley et Satyabrata Ray (1964), aboutissent à des résultats similaires dans l'étude du complexe à 2 couches montmorillonite-alcool (uniquement pour les alcools possédant moins de 6 atomes de C) et décrivent les divers types d'orientation prévisibles des molécules d'alcools, par rapport au plan des atomes d'oxygène superficiels des couches tétraédriques de SiO_2.

La disposition, encore mal précisée de ces molécules d'alcools sur la surface spécifique des minéraux argileux, l'extrême labilité des couches formées, ne permettent pas de retenir actuellement ces composés organiques pour la mesure des aires des surfaces.

Par contre, parmi les polyalcools, l'éthylène-glycol et le glycérol peuvent former un complexe à deux couches avec la motmorillonite. Ils possèdent en effet une molécule capable de se lier à la surface de celle-ci par des liaisons hydrogène du type O—H...O et même du type C—H...O (Brindley et Hoffmann, 1962) et, de ce fait, se présenter en position allongée sur cette surface (Dyal et Hendricks, 1950).

De plus, la forte polarité de ces molécules leur permet de se substituer facilement aux molécules d'eau fixées à la surface des cristallites.

β. *Mesure des surfaces par rétention d'éthylène-glycol.*

Dyal et Hendricks (1950), utilisant ces caractéristiques, proposèrent une technique gravimétrique simple. Considérant que le glycol adsorbé sur chaque côté de la surface interfoliaire avait une pression de vapeur inférieure à celle du glycol libre, ils conclurent que le taux d'évaporation pour un échantillon de montmorillonite saturée avec du glycol, décroissait lorsque tout le glycol libre était éliminé et qu'alors il ne restait plus qu'une couche monomoléculaire de glycol à la fois sur les plans basaux et latéraux des cristallites de montmorillonite et sur les surfaces interfolaires.

Ils observèrent, en étudiant le taux de perte de glycol par évaporation sous vide < 0,1 mm Hg et pour T = 25°C, à partir d'un solvate montmorillonite-glycol, que ce taux devenait très faible pour une rétention de 250 mg de glycol pour un gramme de montmorillonite pure dont la surface théorique, calculée à partir de la maille élémentaire, était de 808 m^2/g (cf. tabl. 2).

Donc, 1 mg de glycol était censé recouvrir une surface de 3,22 m^2. Cette valeur fut confirmée par BRADLEY à partir des densités électroniques, mais, par contre, fut contestée par DIAMOND et KINTER (1956) qui proposèrent 2,23 m^2 : ce dernier encombrement était calculé à partir de la densité du glycol en phase liquide et de l'épaisseur de la monocouche de glycol dans la montmorillonite (3,9 Å).

On continue cependant encore actuellement, d'utiliser la valeur de 3,22 m^2 pour 1 mg de glycol, plus conforme à la réalité, pour cette technique de mesure des aires des surfaces totales des argiles.

La répartition des molécules d'éthylène-glycol fixées à la surface des argiles est évidemment fonction de la nature minéralogique des constituants.

C'est ainsi que pour les minéraux 1 : 1 et 2 : 1 non expansibles, la surface externe est, seule, recouverte par une couche monomoléculaire de glycol à 25°C.

Pour la vermiculite et l'halloysite, une couche monomoléculaire est fixée à la fois sur la surface externe et sur la surface interne. Comme une seule couche monomoléculaire de glycol couvre en même temps les deux faces de l'interfeuillet, on doit considérer dans ce cas que la surface spécifique recouverte par 1 mg de glycol est de 3,22 $m^2 \times 2 = 6,44$ m^2/g. Par contre, les deux faces de l'interfeuillet de la montmorillonite retiennent chacune une couche monomoléculaire de glycol à 25°C.

DYAL et HENDRICKS proposèrent de mesurer la surface externe des minéraux argileux en les chauffant préalablement à 600°C avant de les saturer avec le glycol. Mais, à cette température, on constate, parfois, un début de destruction de la kaolinite (deshydroxylation) et, de ce fait, les résultats obtenus sont quelquefois entachés d'erreur.

Cette technique de mesure par rétention n'est pas une méthode d'équilibre et le moment où il ne reste plus qu'une couche monomoléculaire de glycol est difficile à apprécier.

C'est pourquoi, certains chercheurs (MARTIN, 1955 ; BOWER et GOERTZEN, 1958) apportèrent quelques modifications en opérant sous des conditions d'équilibre relativement définies, c'est-à-dire en incorporant dans l'atmosphère dans laquelle sont placés les échantillons (dessiccateur, four à vide) un solvate (Cl_2Ca-glycol ou bentonite-glycol) ou du glycol libre afin de régulariser la tension de vapeur qui, dans la méthode de DYAL et HENDRICKS, tendait à diminuer fortement au fur et à mesure de l'évaporation du glycol, saturant le ou les échantillons.

MEHRA et JACKSON (1959) constatant qu'à 110°C la montmorillonite ne retenait plus qu'une seule couche de glycérol entre ses feuillets, préconisent, sur cette base, une technique permettant d'apprécier le pourcentage de minéraux à réseaux expansibles dans un mélange argileux.

γ. Estimation des proportions de montmorillonite-vermiculite dans un mélange argileux, à partir des mesures de surfaces par rétention d'éthylène-glycol.

NADEAU (1961) reprend ces essais en utilisant l'éthylène-glycol. A l'aide d'une spirale de quartz, préalablement étalonnée (fig. 4), il put suivre la courbe de la ciné-

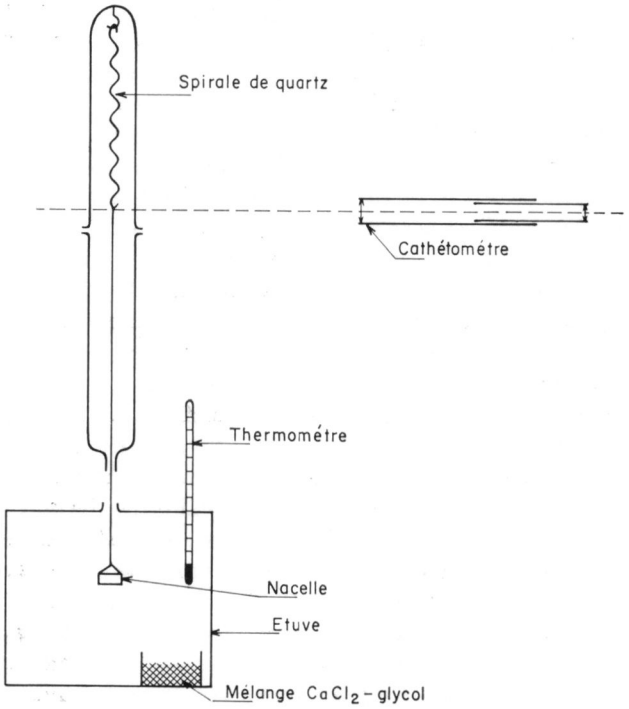


FIG. 4. — *Appareil de mesure de surface.* Technique NADEAU

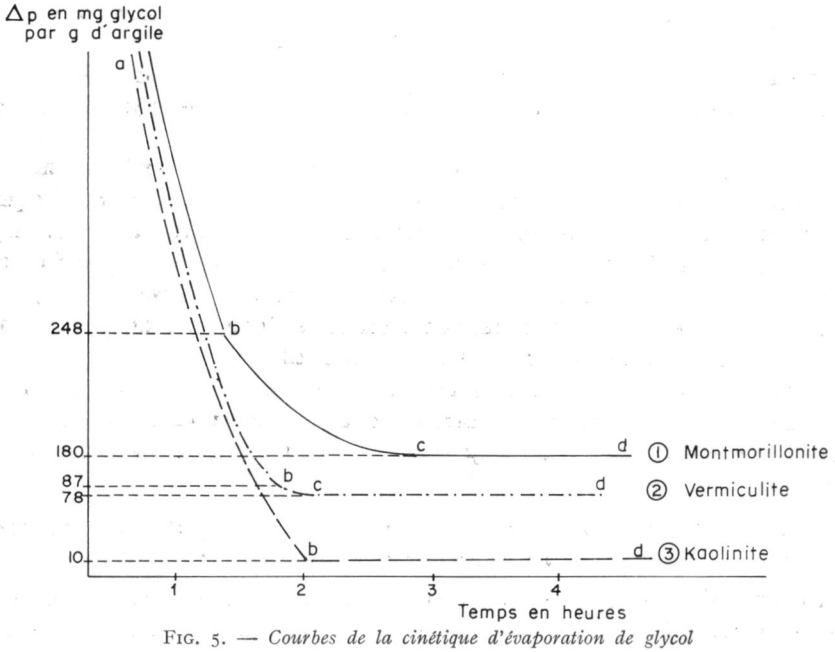


FIG. 5. — *Courbes de la cinétique d'évaporation de glycol*

tique d'évaporation du glycol. Cette courbe présentait, pour la montmorillonite, trois parties (fig. 5) :

— l'une correspondant à l'évaporation du glycol libre (*ab*),

— la deuxième correspondant à l'évaporation d'une couche monomoléculaire de glycol retenu entre les feuillets élémentaires (*bc*),

— enfin, une troisième partie qui représente le palier indiquant l'équilibre (solvate Cl_2Ca-glycol)-(échantillon + 1 couche monomoléculaire de glycol) (*cd*).

C'est ainsi que pour un échantillon de montmorillonite pure, on constate que le taux de perte de glycol par évaporation à 110°C baisse assez rapidement lorsque la quantité de glycol retenue par 1 g de montmorillonite est voisine de 240 mg. A ce moment, la courbe de la cinétique d'évaporation, d'allure presque verticale pendant le départ de glycol libre, tend à s'infléchir (départ d'une couche monomoléculaire d'E. G.), pour finalement atteindre un palier indiquant l'établissement d'un équilibre (Cl_2Ca-E. G.) et (montmorillonite-E. G.).

A ce palier, 130 mg de glycol sont encore retenus. Ils sont répartis à la fois sur la surface externe et en une couche monomoléculaire dans l'espace interfoliaire de la montmorillonite. La différence entre la quantité de glycol enregistrée au moment du départ de la première couche (*yb*) et celle (*yc*) retenue en fin d'évaporation par la montmorillonite, représente la quantité de glycol adsorbée en une seule couche monomoléculaire sur la surface interne, c'est-à-dire environ 110 mg E. G./g de montmorillonite pure.

Ainsi, dans un mélange argileux, la présence de montmorillonite peut être caractérisée par l'allure de la courbe de désorption de glycol, et son pourcentage est alors donné par la formule :

$$\frac{yb - yc}{110} \times 100$$

Le pourcentage de minéraux à réseaux expansibles (montmorillonite + vermiculite) peut être calculé à partir de la formule :

$$\frac{yc - 13}{110} \times 100$$

où 13 mg représentent la quantité de glycol recouvrant la surface latérale des cristallites d'argile.

Diverses techniques par adsorption de molécules polaires autres que l'éthylène-glycol et le glycérol ont été également préconisées dans le but d'améliorer les conditions d'édification de la couche monomoléculaire à la surface des argiles.

Nous mentionnerons ici quelques-unes de ces méthodes.

δ. *Autres techniques de mesures par adsorption chimique.*

On peut les rattacher à deux catégories distinctes :

a) Les unes, nécessitant, comme pour l'éthylène-glycol, l'établissement d'un équilibre (solvate + adsorbat)-(argile + adsorbat) favorisant la fixation de l'adsorbat en une couche monomoléculaire sur les surfaces. Mais l'utilisation de corps polaires présentant un point d'ébullition plus bas que celui du glycol permet d'obtenir un gain de temps appréciable par rapport aux méthodes précédemment décrites.

CARTER *et al.* (1965) remplacent ainsi l'éthylène-glycol (P. E. : 197°C), par l'éther-monoéthylique de l'éthylène-glycol (P. E. : 135°C) et estiment, par comparaison avec les résultats acquis avec le glycol, qu'un milligramme de cet étheroxyde recouvre 3,495 m^2/g.

b) Les autres méthodes, pour éliminer les incertitudes inhérentes au fait qu'il est très difficile de déterminer le moment où l'on dispose réellement d'une monocouche de glycol sur la surface, sont basées sur l'adsorption de molécules polaires de grandes dimensions, à partir de solutions de concentrations variables, déterminées par colorimétrie ou par absorption UV.

C'est ainsi que LAWRIE (1960) préconise une méthode rapide d'estimation des surfaces des sols et des argiles, par adsorption d'orthophénanthroline dont la molécule recouvre 60 $Å^2$.

BOWER (1962) introduit, pour cette technique, l'équation d'adsorption de LANGMUIR dans le calcul des aires des surfaces. La détermination de la quantité d'orthophénanthroline adsorbée à partir de solutions d'équilibre de concentrations croissantes, lui permet de construire un isotherme d'adsorption représenté par une droite dont l'inverse de la pente correspond à la quantité (en m.mole/kg) d'orthophénanthroline formant une couche monomoléculaire à la surface des particules.

Cette technique exige, toutefois, que l'orthophénanthroline soit dépourvue de toute impureté qui s'adsorberait alors préférentiellement, conduisant ainsi à des résultats erronés (sous-estimation des aires des surfaces).

Par contre, GREENLAND et QUIRK (1922-1964) proposent le bromure de cétyl-pyridinium dont la molécule, fixée au maximum d'adsorption perpendiculairement à la surface des particules par l'intermédiaire de son noyau pyridinium et une partie de la chaîne cétyl, couvre alors une surface de 54 $Å^2$.

4. *Précision et spécificité des méthodes décrites*

a) *Précision des méthodes.*

Nous venons de décrire diverses techniques permettant de mesurer les aires des surfaces des particules argileuses.

Mais, comme pour toute mesure, certains facteurs jouent un rôle primordial.

Ainsi, pour l'adsorption des molécules non polaires, la précision des mesures sera d'autant plus grande que le dégazage sera complet (accessibilité des molécules) et qu'aucune variation de la température ambiante ne se manifestera au cours de ces mesures.

Les facteurs, température et tension de vapeur, ont également une grande influence sur la rétention des molécules polaires par les cristallites. Les mesures par adsorption de glycol doivent être effectuées à 25°C ($\pm$ 0,5°) et la tension de vapeur être maintenue à une valeur constante par l'évaporation de glycol à partir d'un solvate comprenant 100 g de Cl_2Ca et 20 g de glycol.

Dans toutes les méthodes par adsorption, la pureté de l'adsorbat est un point capital (gaz à 99,999 p. 100 ; redistillation de l'éthylène-glycol).

Lorsque tous ces facteurs sont respectés, on peut obtenir des mesures très précises et les différences enregistrées entre les valeurs des aires des surfaces pour un même échantillon s'avèrent très faibles (1 à 2 p. 100).

b) *Spécificité des méthodes.*

La surface externe des particules argileuses est déterminée, de préférence, par adsorption de molécules non polaires (N_2, C_4H_{10}, Kr, etc.) alors que les molécules polaires (glycol-glycérol) sont utilisées pour les mesures des aires des surfaces totales. La différence entre les valeurs de ces aires fournira celle de la surface interne pour les minéraux argileux « gonflants » (montmorillonite, vermiculite).

Toutefois et bien qu'employant la même méthode spécifique de mesure, dans des conditions précédemment définies, on constate que, *pour un même constituant argileux*, la valeur de l'aire de sa surface peut être variable.

Il semblerait donc que la présence d'éléments indépendants de la structure chimique propre du minéral argileux, mais qui présenteraient toutefois un contact très intime avec sa surface (externe et interne), ait une certaine incidence sur la mesure de l'aire de cette surface.

Parmi les éléments ainsi retenus à la surface des particules, citons principalement les cations échangeables, l'eau hygroscopique et la matière organique et c'est leur influence sur la mesure des surfaces spécifiques des argiles que nous allons essayer de définir.

5. *Incidence de divers éléments sur la mesure des surfaces spécifiques*

a) *Rôle des cations échangeables.*

Nous avons déjà signalé que la surface, et notamment la surface interne des minéraux argileux, n'est pas lisse, mais que, au contraire, elle présente une morphologie plus ou moins accentuée, selon le nombre et la nature des cations échangeables qui y sont fixés.

De ce fait, les molécules polaires adsorbées doivent donc épouser parfaitement cette morphologie. Aussi, la quantité de molécules nécessaire pour former une couche monomoléculaire sur la surface dépendra non seulement de l'aire de cette surface, mais également de la nature des cations échangeables fixés et par là, de leur énergie de rétention vis-à-vis de ces molécules polaires.

L'intensité de la rétention des molécules polaires par les argiles homoioniques est dans l'ordre : $K^+ < Na^+ < Al^{+++} < Mg^{++} < Ca^{++}$.

Mac Neal (1964) a démontré que dans les argiles Ca, deux molécules de glycol sont associées à chaque cation Ca^{++} échangeable, d'où une surestimation de l'aire réelle des surfaces. Mais, comme le plus souvent le complexe échangeable est constitué en majeure partie d'ions Ca^{++}, la rétention de glycol (dans les conditions standard) par l'argile Ca reste une indication valable pour la mesure de l'aire des surfaces (tabl. 5).

Confirmant les données précédentes, Dowdy et Mortland (1967-1968), par l'étude des spectres infrarouges de complexes éthanol-montmorillonite et glycol-montmorillonite (la montmorillonite étant saturée avec Na^+, NH_4^+, Ca^{++}, Cu^{++}, Al^{+++}), mettent en évidence une importante interaction dipôle-ions polyvalents (Ca^{++}, Cu^{++}, Al^{+++}) au détriment de la liaison OH...O (dipôle-surface des particules).

Ils décèlent, par contre, une faible interaction dipôle-ions monovalents (Na^+, NH_4^+), ce qui redonne ainsi une plus grande importance à la liaison OH...O, avec, pour corollaire, un arrangement plus prévisible des molécules polaires sur la surface,

par suite d'une concentration plus restreinte de ces molécules autour des sites d'adsorption des cations.

MAMY (1968) en mesurant l'aire des surfaces d'une montmorillonite (saturée avec des cations de nature différente) à partir des isothermes d'adsorption de la vapeur d'eau (théorie B. E. T.) trouve également des valeurs variables en fonction de la nature du cation échangeable (tabl. 5).

TABLEAU 5

Aires des surfaces (en m^2/g) *des minéraux argileux en fonction de leur cation échangeable*

1. *Détermination avec éthylène-glycol* (MAC NEAL, 1963)

	K^+	Na^+	Ca^{++}	Al^{+++}
Montmorillonite (Polksville Mississipi)	402	631	860	763
Illite (Fithian-Illinois)	84	106	142	125
Kaolinite Lamar Pit (S. Caroline)	12,9	22,5	45	35,4
Vermiculite (Libby-Montana)	96,6	238	676	483

2. *Détermination avec* N_2 *et éthylène-glycol* (MAMY, 1968)

	Surface externe	Surface totale
Montmorillonite Li	67	840
— Na	45-55	830
— K	44-50	790
— Cs	137	770

3. *Détermination avec* N_2 (*surface externe*). *Particules* 0,1-1 μ (RAMAN et MORTLAND, 1966)

	Ca	Mg	Li	Na	K	NH_3 gaz
Vermiculite Libby (Montana)	46,7	51,3	50,6	48,8	38,3	36,8

La fixation de N_2 (adsorption physique) sur la surface de particules de vermiculite est également influencée par le cation du complexe adsorbant (RAMAN et MORTLAND, 1966). Dans ce cas, toutefois, les différences enregistrées sont imputables à la fermeture ou à l'obstruction plus ou moins prononcée des espaces interfoliaires de la vermiculite selon la nature des cations échangeables présents dans l'interfeuillet (tabl. 5).

b) *Influence des molécules d'eau.*

Elle se manifeste surtout lors des mesures impliquant l'adsorption de molécules neutres ou polaires en phase gazeuse. La disparition totale de l'eau hygroscopique retenue à la surface des particules est une des conditions primordiales pour la précision de ces mesures.

Il semble qu'il soit inutile de s'appesantir sur le rôle joué par ces molécules d'eau puisque, pour les méthodes de mesure décrites précédemment, elles doivent être éliminées des surfaces externe et interne des minéraux argileux avant toute adsorption de molécules.

Cependant, les surfaces des particules argileuses ne sont pas toujours exclusivement « contaminées » par les molécules d'eau, mais peuvent l'être également par la matière organique.

La présence de cette matière organique, parfois intimement liée à la surface des argiles, peut causer des variations sensibles de l'aire de cette surface.

c) *Incidence de la matière organique.*

La figure 6 montre l'influence du taux de matière organique sur l'aire des surfaces externes et totales d'un échantillon d'argile, extrait de sols noirs, riches en matière

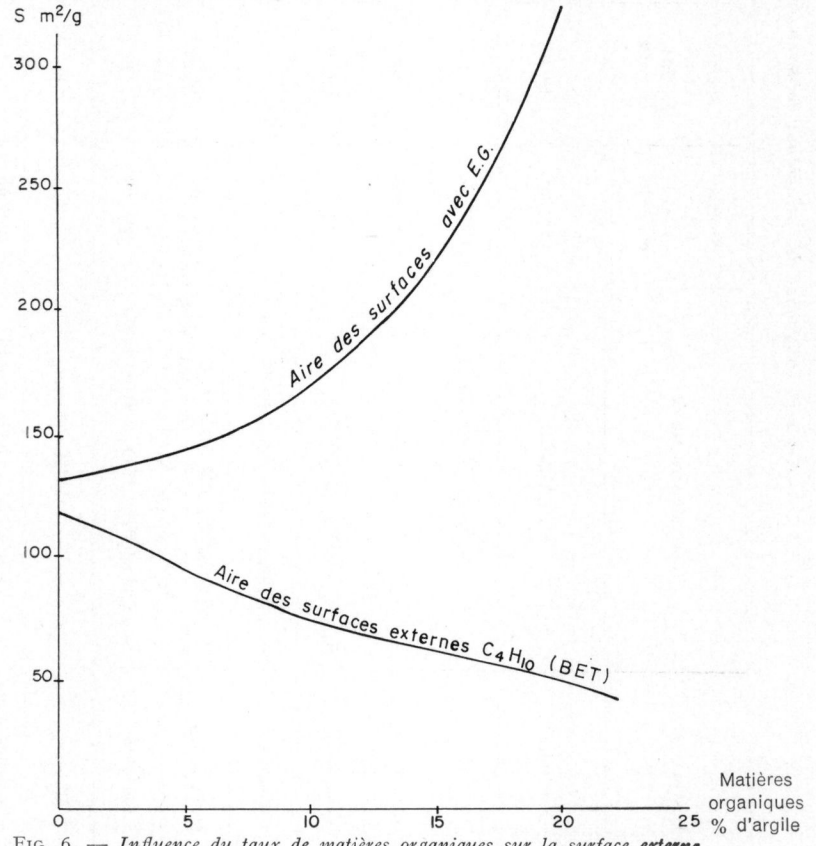


FIG. 6. — *Influence du taux de matières organiques sur la surface* ***externe*** *et la surface totale d'un échantillon d'argile (Haute-Vienne)*

TABLEAU 6

Surfaces spécifiques des principaux minéraux argileux et oxydes

Désignation	Formule structurale	Surface totale E. G. en m^2/g	Surface externe N_2-C_4H_{10} en m^2/g	Surface interne en m^2/g	C. E. C. en méq/100 g	Auteurs
Kaolinite	$Si_2O_2Al_2(OH)_4$	10- 30	10-30	0	10-20	Caillère-Hénin, 1963 Fripiat, 1964 Grim, 1953
Illite	$(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(Al, Fe^{III})_2OH_2K_x$	100-175	—	—	20-30	Mac Neal-Sansoterra, 1963 Grim, 1953
Montmorillonite	$Si_4O_{10}(Al_{2-x}Mg_x)OH_2$ C. E.$_x$	700-800	80	600-700	105	Fripiat, 1964 Dyal-Hendricks, 1950
Vermiculite	$(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(Mg_{3-y}Fe_y^{III})OH_2$ C. E.$_{(x-y)}$	760	40-60	700	154	Mehra-Jackson, 1959 Alexiades-Jackson, 1965
Chlorite	$(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(MgFe^{II})_2(Mg_{3-x}Fe_x^{III})(OH)_8$	100-175	—	—	10-25	Caillère-Hénin, 1963 Mac Neal-Sansoterra, 1963
Palygorskite	$(Si_{8-x}Al_x)O_{20}(Mg_{5-x}Al_x)OH_2\,4H_2O$ (+ $4H_2O$ zéol.)	250-400	200-300	—	20	Caillère-Hénin, 1963 Guyot-Dejou, 1966
Sépiolite	$Si_{12}O_{30}Mg_8(OH)_4\,4\,H_2O$ (+ $8H_2O$ zéol.)	300-400	300	—	20-30	Caillère-Hénin, 1963 Guyot-Dejou, 1966
Gibbsite	$Al(OH)_3$	2,5	—	—	0	Gastuche, Fripiat et de Kimpe, 1962
Gel silico-aluminique	$Al_2O_3/Al_2O_3 + SiO_2 = 0{,}13$	300-400	—	—	150	Fripiat, 1964
Gel de silice		300-400	—	—	—	Fripiat, 1964
Anatase	TiO_2	10	—	—	—	Jackson, 1956

organique de la région d'Eymoutiers (Haute-Vienne) et décrits par ailleurs (DEJOU et *al.*, 1967-1968).

On peut distinguer :

1) un accroissement de l'aire des surfaces totales, mesurée par rétention d'éthylène-glycol, corrélativement à une augmentation du taux de matière organique ;

2) une diminution de l'aire des surfaces externes (obtenue à partir des isothermes d'adsorption de C_4H_{10} à 0°C) au fur et à mesure que le taux de matière organique croît (les molécules d'eau fortement retenues par celle-ci sont difficilement éliminées par dégazage et interdisent de ce fait l'accessibilité des molécules de butane à la surface des particules argileuses). BURFORD *et al.* (1964) ont fait les mêmes constatations en étudiant l'influence du taux de C résiduel après attaque avec H_2O_2, dans un échantillon de limon d'Urrbrae (Australie) sur les aires des surfaces totales déterminées par adsorption de bromure de cétylpyridinium et des surfaces externes obtenues à partir des isothermes d'adsorption de N_2 à — 198°C.

On doit donc en conclure qu'il est nécessaire d'éliminer la matière organique d'un échantillon d'argile ou de sol avant toute mesure tendant à la détermination de l'aire de la surface spécifique. Des adjonctions modérées d'H_2O_2 permettent une extraction de la matière organique, sans provoquer une altération sensible de la structure des minéraux phylliteux.

6. *Données sur les surfaces spécifiques des principaux minéraux argileux et oxydes*

Ainsi, après que les diverses opérations nécessaires, énoncées dans cette note (dégazage, extraction par H_2O_2) aient permis le départ d'éléments « perturbateurs » comme l'eau hygroscopique et la matière organique, les argiles peuvent être soumises aux techniques d'adsorption physique et chimique pour la détermination de leurs surfaces spécifiques.

Nous avons pensé qu'il serait utile de présenter, à titre indicatif, les valeurs moyennes des aires des surfaces spécifiques des principaux constituants argileux et de quelques oxydes.

Toutes ces valeurs, associées à celles de la capacité d'échange de cations ont été portées dans le tableau 6.

Il convient toutefois de signaler l'absence, dans ce tableau, des aires des surfaces externes des gels siliciques et alumino-siliciques. La surface externe de ces composés amorphes, présentant des édifices sans structure périodique (PEDRO et LUBIN, 1968) est très difficile à définir, car les traitements préliminaires (dégazage) effectués avant l'adsorption de molécules non polaires peuvent causer un début de destruction des édifices (départ H_2O) et, de ce fait, conduire à une sous-estimation de la surface externe réelle.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Nous venons de décrire les principales méthodes, fondées sur les phénomènes d'adsorption et contribuant à la mesure des surfaces spécifiques des argiles dont la caractérisation de l'interface est d'un grand intérêt.

Parmi ces techniques, certaines (adsorption de molécules neutres telles que N_2, C_4H_{10}, CO_2, O_2, etc.) ne permettent d'obtenir que l'aire de la surface externe. D'autres (adsorption de molécules polaires : éthylène-glycol, glycérol, etc.) définissent la surface totale des minéraux argileux et conduisent, par ce biais, à la détermination de la surface interne (cas des minéraux à réseaux expansibles).

Mais il apparaît que les aires de ces surfaces sont influencées par la nature des cations échangeables qui y sont retenus, pour compenser le déficit de charge. On constate, en effet, que les argiles saturées par des cations polyvalents, à forte énergie de rétention vis-à-vis des molécules polaires, présentent un plus grand pouvoir de fixation que celles saturées par des cations monovalents ; il y a, en quelque sorte, compétitivité entre la surface des argiles et les cations pour l'adsorption des molécules polaires.

La connaissance de la nature des cations échangeables est donc indispensable pour établir une bonne interprétation des résultats obtenus à partir de l'adsorption chimique.

L'incidence marquée du taux de matière organique sur les aires des surfaces, déterminées par adsorption de molécules polaires et neutres, montre bien la nécessité de procéder à une élimination complète de cette dernière avant toute adsorption.

Il s'ensuit donc de tout ce qui précède que la mesure des surfaces spécifiques des argiles peut être effectuée, avec beaucoup de précision, si l'on opère dans des conditions définies pour favoriser l'édification d'une couche monomoléculaire, en phase gazeuse ou liquide, sur des surfaces qui ont été préalablement débarrassées de tout corps susceptible de créer des interférences (H_2O-matière organique).

Les résultats ainsi obtenus doivent ensuite être interprétés en tenant compte de la structure cristallo-chimique particulière de l'argile étudiée et de la nature des cations échangeables dont elle est saturée.

Reçu pour publication en mai 1969.

SUMMARY

MEASURING, BY ADSORPTION, THE SPECIFIC SURFACES OF CLAY SOILS

Considering the problems met with when measuring the specific surfaces of clays from the sizes of their particles, the more commonly-used methods are based on adsorption phenomena of two definite types :

i) *Physical adsorption* of non-polar molecules (N_2, C_4H_{10}, O_2, etc.) under definite conditions to promote building up of a monomolecular layer over the surface of the clay particles. Applying the BRUNAUER, EMMET and TELLER method, to the portion of the adsorption isotherm within the range of relative pressures 0,05 to 0.35, enables to determine the volume of gas adsorbing in a monomolecular layer and thereby to calculate the area of the specific surfaces of non-swelling minerals of the 1/1, 2/1 and 2/2 type, and of canalicular minerals as well, such as sepiolite and palygorskite, provided that all the zeolitic water is removed prior to adsorption.

ii) *Chemical adsorption*, which involves polar molecules, (ethylene-glycol, glycerol). The methods based on this type of adsorption are conducive to determining the area of the internal surfaces of expandable-lattice minerals. However, they are not so dependable as those based on physical adsorption owing to the uneven surface arrangement of the polar molecules close to where adsorption of the exchangeable cations is taking place.

The basic principle of these methods consists in balancing the vapour pressure of a dipolar solvate with that of a dipolar-clay complex so as to build up a monomolecular layer of this dipole on the inner and outer surfaces of the clay.

The area of the specific surfaces depends on the nature of the exchangeable cations saturating them, and are the greater as the compensating cations have a high retention energy with respect to the polar molecules.

The organic matter associated with the clay may disturb the measurement of surfaces by emphasizing the retention of polar molecules or, conversely, impeding the neutral molecules from reaching the surface of the clay soil.

ZUSAMMENFASSUNG

MESSUNG DER SPEZIFISCHEN OBERFLÄCHEN VON TONBÖDEN MITTELS ADSORPTION

In Anbetracht der bei der Messung der spezifischen Oberflächen von Tonböden ausgehend von deren Teilchengrössen begegneten Schwierigkeiten, werden vorzugsweise Methoden benutzt, die sich auf Adsorptionsphänomene zweier bestimmter Typen stützen :

1° *Die physikalische Adsorption* von nicht-polaren Molekülen (N_2, C_4H_{10}, O_2, u. s. w.) unter genau bestimmten Bedingungen mit dem Ziel, die Bildung einer monomolekularen Schicht an der Oberfläche der Tonteilchen zu fördern. Die auf den Teil zwischen den relativen Drücken 0,05 bis 0,35 der Adsorptionsisotherme angewandte B. E. T.-Gleichung (1) erlaubt, durch Bestimmung des in einer monomolekularen Schicht adsorptierten Gasvolumens, den Raum der spezifischen Oberflächen von nicht-quellenden Mineralen des Typus 1/1, 2/1 und 2/2, sowie von Mineralen mit kleinen Kanäle (palygorskite sepiolite) nach Beseitigung des gesamten zeolitischen Wassers vor der Adsorption, zu berechnen.

2° *Die chemische Adsorption,* welche die polaren Moleküle (A et hylenglycol, Glycerol) anbetrifft. Die auf diesem Adsorptionstypus beruhenden Methoden tragen dazu bei, die Abmessungen der Innenflächen der Minerale mit ausdehnbaren Netzen zu bestimmen. Sie sind jedoch weniger präzis als diejenigen, die auf physikalischen Adsorption beruhen ; dies erklärt sich durch die Untregelmässigkeit in der Verteilung der polaren Moleküle auf den Flächen in der Umgebung der Adsorptionsstellen der Austauscher-Kationen.

Das Prinzip dieser Methoden besteht darin, die Gleichgewichtsbedingungen zwischen den Dampfspannungen eines Solvat-Dipols und eines Ton-Dipol-Komplexes zu erfüllen, wodurch die Errichtung einer monomolekularen Schicht dieses Dipols auf den Ausseren und inneren Tonoberflächen ermöglich wird.

Die Werte der spezifischen Oberflächen wechseln je nach der Natur der Austauscher-Kationen, mit denen sie gesättigt sind, ab. Sie sind um so grösser, als die ausgleichenden Kationen eine grässere Rückhalte-Energie gegenüber den polaren Molekülen besitzen.

Die mit dem Ton gebundenen organischen Stoffe bilden ein Element, das die Messung der Oberflächen stören kann, indem es das Zurückhalten der polaren Moleküle fördert, oder im Gegenteil die Zugänglichkeit zu den neutralen Molekülen der Tonoberflächen hindert.

РЕЗЮМЕ

Измерение специфических поверхностей глин при помощи адсорбции.

Ж. ГЮЙО.

В виду трудностей встреченных при измерении специфических поверхностей глин с помощью размеров их частичек, автор предпочел применить методы двух различных типов, основанные на явлениях адсорбции :

1. *Физическая адсорбция* неполярных молекул (N_2, C_4H_{10}, O_2 и т. д.) в определенных условиях, дабы содействовать образованию мономолекулярного слоя на поверхности глинистых частичек. Уравнение Б. Е. Т. примененное к изотермической части адсорбции, находящейся между

относительными давлениями 0,05 и 0,35 позволяет рассчитать с помощью определения об'ема газа адсорбированного в мономолекулярном слое, поверхности специфических площадей ненабухающих минералов типа 1/1, 2/1 и 2/2 и желобчатых минералов (сепиолит палигорскит), в случаях когда цеолитическая влага удалена перед адсорбцией.

2. *Химическая адсорбция* относящаяся к полярным молекулам (этилен, гликол, глицерол). Методы основанные на этом типе адсорбции помогают определить площади внутренних поверхностей минералов с расширяющейся сетью. Они однако менее точны чем методы основанные на физической адсорбции, ввиду нерегулярности расположения полярных молекул на поверхности, по соседству с местоположениями адсорбции обменных катионов.

Принципом этих методов является установление условий равновесия между напряжением паров диполярной жидкости и комплексом диполярной глины, чтобы таким образом образовать мономолекулярный слой на внешней и внутренней поверхностях глин.

Площади специфических поверхностей изменяются сообразно природе обменных катионов которые их насыщают. Площади эти тем более велики, чем сильнее энергия задержания катионами-компенсаторами полярных молекул.

Органическое вещество связанное с глиной представляет элемент способный затруднить измерения поверхностей, ибо оно усиливает задержание полярных молекул, или, напротив, затрудняет нейтральным молекулам достуи к поверхности глин.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Barshad I., 1952. Factors affecting the interlayer expansion of vermiculite and montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **16**, 176-182.

Bower C. A., 1963. Adsorption of O. Phenanthroline by clay minerals and soils. *Soil Sci.*, **95** (3), 192-195.

Bower C. A., Goertzen J. O., 1959. Surface area of soils and clays by an equilibrium ethylene-glycol method. *Soil Sci.*, **87** (5), 289-292.

Bradley W. F., 1945. Molecular associations between montmorillonite and some polyfunctional organic liquids.

Brindley G. W., Hoffmann R. W., 1962. Orientation and packing of aliphatic chain molecules on montmorillonite. *Clay-organic Studies VI, Clays and clay minerals*, **9**, 546-556.

Brindley G. W., Satyabrata Ray, 1964. Complexes of Ca-montmorillonite with primary monohydric alcohols. *Clay-organic Studies VIII, The Am. Min.*, **49**, 106-115.

Brunauer S., Emmett P. H., Teller Ed., 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. amer. chem. Soc.*, **60**, 309-319.

Burford J. R., Deshpande T. L., Greenland D. J., Quirk J. P., 1964. Influence of organic materials on the determination of the specific surface areas of soils. *J. Soil Sci.*, **15** (2), 192-201.

Caillère S., Hénin S., 1963. *Minéralogie des argiles*. 355 p. Masson, Paris.

Carter D. L., Heilman M. D., Gonzalez C. L., 1965. Éthylene-glycol monoethyl-ether for determining surface area of silicate minerals. *Soil Sci.*, **100** (5), 356-360.

Dejou J., Guyot J., Morizet J., 1967. Présence de sols noirs, très riches en matières organiques, sur les leucogranites de la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute-Vienne). *C. R. Acad. Agric.*, **53** (3), 264-273.

Dejou J., Guyot J., Morizet J., 1968. Juxtaposition de sols noirs très riches en matières organiques et de sols bruns acides sur leucogranites dans la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute-Vienne). *Ann. agron.*, **19** (5), 511-539.

Diamond S., Kinter E. B., 1956. Surface areas of clay minerals as derived from measurements of glycerol retention. *Clays and Clay Minerals*, **5**, 334-347.

DOWDY R. Y., MORTLAND M. M., 1967. Alcohol-water interactions on montmorillonite surfaces. I. Ethanol. *Clays and Clay Minerals*, 15th Conf. Pittsburg Pennsylvania, Pergamon Press, Oxford and New York, 259-271.

DOWDY R. Y., MORTLAND M. M., 1968. Alcohol-water interactions on montmorillonite surfaces. II. Ethylène-glycol. *Soil Sci.*, **105** (1), 36-43.

DYAL R. S., HENDRICKS S. B., 1950. Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil Sci.*, **69** (6), 421-432.

EMSCHWILLER G., 1961. *Chimie-Physique.* 3 tomes, 1 623 p., Presses universitaires de France, Paris.

FARRAR D. M., 1963. The use of vapour-pressure and moisture-content measurements to deduce the internal and external surface area of soil particles. *J. Soil Sci.*, **14** (2), 303-321.

FRIPIAT J. J., 1960. Surface properties of clays and gels. *7th internation. Congr. Soil Sci.*, Madison, **4**, 502-511.

FRIPIAT J. J., 1964. Surface properties of alumino-silicates. *Clays and Clay Minerals.* Proc. of the 12th Nat. Conf. Atlanta (sept/oct 1963), Pergamon Press, 327-358.

GASTUCHE M. C., FRIPIAT J. J., DE KIMPE C., 1962. *La genèse des minéraux argileux de la famille du kaolin.* I. Aspect colloïdal. Genèse et synthèse des argiles. 57-65, C. N. R. S.

GLAESER R., 1954. *Complexes organo-argileux et rôle des cations échangeables.* Thèse, Paris, 68 p.

GREENLAND D. J., QUIRK J. P., 1962. Surface areas of soil colloïdes. *Internation. Soil Conf. N. Zealand*, 1-11.

GREENLAND D. J., QUIRK J. P., 1964. Determination of the total specific surface areas of soils by adsorption of cetyl pyridinium bromide. *J. Soil Sci.*, **15** (2), 178-191.

GRIM R. E., 1953. *Clay mineralogy*, 384 p. McCRAW, Hill book company Inc., New York.

GUYOT J., DEJOU J., 1966. Contribution à l'étude de la détermination des aires des surfaces externes des minéraux argileux par l'utilisation des isothermes d'adsorption du butane à 0°C. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **263**, série D, 1 669-1 672.

JACKSON M. L., 1956. *Soil chemical analysis advanced course*, 991 p. University of Wisconsin, Madison 6.

LAWRIE D. C., 1961. A rapid method for the determination of approximate surface areas of clays. *Soil Sci.*, **92**, 188-191.

MAC EWAN D. M. C., 1948. Complexes of clays with organic compounds. I. Complexes formation between montmorillonite and halloysite and certain organic liquids. *Trans. Faraday Soc.*, **44**, 349-367.

MAC NEAL B. L., 1964. Effect of exchangeable cations on glycol retention by clay minerals. *Soil Sci.*, **97** (2), 96-102.

MAC NEAL B. L., SANSOTERRA T., 1964. Mineralogical examination of arid-land soils. *Soil Sci.*, **97** (6), 367-375.

MAMY J., 1968. *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite.* Thèse, Paris.

MARTIN R. T., 1955. Ethylene-glycol retention by clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **19**, 160-163.

MEHRA O. P., JACKSON M. L., 1959. Constancy of the sum of mica unit cell potassium surface and interlayer sorption surface in vermiculite-illite clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23** (2), 101-105.

NADEAU J. C., 1961. Évaluation de la proportion et de la nature des réseaux expansibles dans un mélange d'argiles. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **253**, 162-164.

NELSEN F. M., EGGERTSEN F. T., 1958. Determination of surface area. Adsorption measurements by a continuous flow method. *Anal. Chem.*, **30** (8).

PAULING L., 1960. *The nature of the chemical bond*, 644 p., Cornell University press, Ithaca.

PEDRO G., LUBIN J. C., 1968. Étude sur l'évolution géochimique des gels alumino-siliciques et la formation des hydroxydes d'aluminium en conditions de libre drainage. *Ann. agron.*, **19** (3), 293-347.

QUIRK J. P., 1955. Significance of surface areas calculated from water vapor sorptions isotherms by use of the B. E. T. equation. *Soil Sci.*, **80** (6), 423-430.

RAMAN K. V., MORTLAND M. M., 1966. External specific surface area of vermiculite. *Amer. mineral.*, **51**, 1787-1792.

YOUNG D. M., CROWELL A. D., 1962. *Physical adsorption of gases.* 426 p., Butterworths, London.

Ann. agron., 1969, **20** (4), 361-369.

INFLUENCE DU SYSTÈME DE CULTURE SUR L'ÉCOULEMENT DE L'EAU DANS UN SOL MAL STRUCTURÉ

J.-R. MARTY et Marielle COURAU

avec la collaboration technique de Nicole DESWEEMER, M. CABELGUENNE et A. HILAIRE

Station d'Agronomie et d'Œnologie,
67, Boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La circulation de l'eau est étudiée en fonction de différents systèmes de culture, dans un sol en place, limoneux, assez mal structuré. Infiltration et filtration sont envisagées séparément. En s'appuyant sur des études expérimentales réalisées dans des milieux artificiels (COURAU, 1968), l'effet des forces de succion exercées par un sol sec est mis en évidence au cours de l'infiltration. Le rôle joué par la porosité, l'enracinement, la structure est étudié au cours de la filtration et s'avère aussi important lors de la réhumectation. Les observations et mesures sont discutées en tentant de dégager l'influence du système de culture sur l'écoulement de l'eau dans le sol.

INTRODUCTION

La pénétration de l'eau dans le sol est sous l'influence de nombreux facteurs, notamment la texture et l'état structural ; ce dernier est conditionné en partie par le système de culture. De plus, et dans tous les cas, les forces de succion exercées par un sol sec jouent un rôle primordial ; leur importance a pu être établie par ailleurs grâce à une étude expérimentale sur la circulation de l'eau dans des milieux artificiels (COURAU, 1968). En nous référant à cette étude, nous aborderons les modalités de la circulation de l'eau dans un sol en place, assez mal structuré, portant diverses cultures et considéré à divers états d'humidité.

Nous avons choisi pour nos essais une boulbène sur horizon argileux (MARTY, 1968). Ce type de sol, limoneux en surface, argileux en profondeur, pauvre en matières organiques, réputé peu perméable, nous a permis de bien dissocier les phénomènes d'infiltration et de filtration. D'autre part, les expériences effectuées sur des cultures différentes nous ont donné la possibilité d'apprécier le rôle des voies de circulation préférentielles et de juger de l'importance du système de culture sur la circulation de l'eau.

Rappelons brièvement que l'infiltration est la pénétration de l'eau dans les interstices d'un corps poreux sec et la filtration le passage de l'eau à travers ce même corps une fois saturé.

TECHNIQUES ET CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Les trois parcelles utilisées pour cette étude se situaient sur un sol de même nature, mais de structure diversifiée par les cultures (tabl. 1). Ces parcelles portaient au cours des observations :

1. Une fétuque en 3e année de végétation
2. Un chaume de blé dans un assolement blé-maïs
3. Une vigne de vingt ans cultivée en sol nu

TABLEAU I

Profil cultural succinct des différentes parcelles

Profondeur (cm)	Texture moyenne		Structure	Densité de l'enracinement (1)	
	P. 100 argile	P. 100 limons (2 à 50 μ)		profondeur prélèvement (cm)	kg/ha de racines sèches
			1. *Fétuque* (3e année)		
0-30	12,7	71,5	Tendance nettement grumeleuse	0-5 5-15 15-30	6 000 1 900 1 500
30-60	16,9	66,0	Continue, quelques agrégats arrondis autour des racines	30-45 45-60	450 200
60-100	41,8	48,2	Polyédrique à clivages verticaux	60-70	80
			2. *Blé* (assolement blé-maïs)		
0-30	13,8	70,8	Continue, tendance grumeleuse autour des touffes de blé	0-7 (2) 7-20 20-30	615 412 70
30-60	15,6	70,2	Continue, tendance polyédrique de faible cohésion	30-50	68
60-100	40,7	49,7	Polyédrique à clivages verticaux	50-70	4
			3. *Vigne* (cultivée en sol nu)		
0-30	13,0	69,2	Continue, particulaire	(3)	
30-60	16,2	68,8	Continue, tendance particulaire		
60-100	41,3	49,7	Polyédrique à clivages verticaux		

(1) Déterminée par prélèvements à l'aide de cylindres enfoncés horizontalement aux différentes profondeurs (MAERTENS, 1964).

(2) Effectuée au moment de la montaison du blé.

(3) N'a pu être déterminée, mais les observations sur le profil montrent que l'enracinement de la vigne est assez important entre 20 et 50 cm et diminue ensuite avec la profondeur. Des radicelles descendent au-delà de 1 mètre.

La topographie était pratiquement plane, sauf dans le cas de la vigne où existait une très légère pente.

L'humectation des profils a été réalisée sous charge d'eau constante de 8 cm de hauteur et sur une section de 0,3 m², selon le principe de la méthode de BURGER (DUCHAUFOUR, 1960).

Les profils hydriques de réhumectation ont été établis à l'aide d'un humidimètre à neutrons. Précisons que dans les différentes parcelles, les tubes de mesure étaient en place depuis plus de deux ans et avaient permis de suivre la réhumectation et la dessiccation du sol, sous différentes cultures, en fonction des conditions climatiques (MARTY, 1968). Après ce laps de temps, les qualités de structure, d'enracinement, correspondaient réellement, autour de chaque tube, aux conditions naturelles du sol sous différents systèmes de culture. Après nos expériences, des fosses ouvertes au niveau des tubes (parcelles 2 et 3) nous ont permis de contrôler que le contact tube-sol était parfaitement assuré.

En régime d'infiltration et de filtration, les débits ont été calculés d'après les quantités d'eau introduites sur cette section.

Afin de suivre le mouvement de l'eau en régime de filtration, nous avons utilisé une solution de chlorure de calcium (COLLIS-GEORGE, HENIN, KELLY, 1963) à concentration en chlore relativement faible à cause des cultures en place (0,8 g de chlore par litre). Cette solution était introduite en quantité suffisante pour remplacer la totalité de l'eau du profil sur plus d'un mètre de profondeur. Aussitôt après la filtration de cette solution, sur des échantillons de terre prélevés à la tarière à différentes profondeurs, le chlore était dosé par mercurimétrie (CHARLOT, 1961). Ces prélèvements permettaient aussi d'effectuer des mesures d'humidité et les résultats obtenus étaient, dans tous les cas, comparables à ceux fournis par l'humidimètre à neutrons, aux erreurs de densité apparente près.

Par ailleurs, au cours d'une expérience conduite en sol sec, nous avons vérifié que le chlore introduit se retrouvait en totalité au sein du profil réhumecté. Le tableau 2 montre que l'augmentation de la concentration en chlore du sol correspond bien à l'augmentation de l'humidité due à l'eau chlorurée. Il s'ensuit que, dans un sol où la teneur en eau, exprimée en volume, resterait constante et égale à 30 p. 100, si toute la porosité correspondant à ces 30 p. 100 d'eau participait à l'écoulement, l'eau chlorurée du sol aurait alors la même concentration que celle de la solution introduite.

TABLEAU 2

Infiltration d'une solution de chlorure de calcium à 0,8 g/l Cl^- dans un sol sec : concentration en chlore le long du profil d'après les différences de concentrations en chlore (ΔCl^-) *et d'humidités pondérales* (ΔHp), *avant et après l'infiltration*

Profondeur (en cm)	ΔCl^- (en ‰)	Δ Hp (en %)	$\frac{\Delta Cl^-}{\Delta Hp}$ en g/l
10	0,17	21	0,8
20	0,15	11	0,8
30	0,13	17	0,8
40	0,12	15	0,8
50	0,10	13	0,8
60	0,065	6	1,0

Signalons enfin que l'eau chlorurée circule uniquement à la verticale dans l'horizon limoneux. Cela a été vérifié au moyen de sondages, effectués à 20 cm de distance à l'extérieur des cylindres et à différentes profondeurs, qui ont conduit aux mêmes valeurs de concentration en chlore avant l'introduction de l'eau chlorurée et après plusieurs jours d'essais.

Ces conditions expérimentales furent parfois délicates à réaliser et à contrôler, notamment : l'étanchéité des cylindres au contact du sol, le maintien de la charge d'eau constante, les mesures de vitesse d'infiltration. D'autre part, l'emplacement du tube de mesure au centre du cylindre peut être critiqué : difficulté des mesures d'humidité de surface par suite de la charge d'eau, risque de perturbation du profil lors de l'installation du tube, enfin possibilité d'une solution de continuité latérale terre-tube. Il est pratiquement très difficile d'apprécier l'importance de ces sources d'erreurs ; toutefois, si la valeur intrinsèque des résultats obtenus peut être taxée d'incertitude, leur valeur relative reste comparable et la mise en œuvre simultanée des différentes techniques précédemment décrites, nous a permis d'aborder l'étude de la circulation de l'eau dans ces terres mal structurées.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. *L'infiltration*

Dans les trois cas étudiés, nous sommes partis d'un sol sec, sans croûte de battance, dont les 30 premiers centimètres étaient au voisinage de pF 4,2. Dans ces conditions, la réhumectation a été rapide, et la mise en état de saturation pratiquement totale de la partie limoneuse du profil n'excédait pas 24 heures (tabl. 3). Notons que le taux d'humidité après saturation est proche de celui à la capacité au champ.

TABLEAU 3

Évolution des vitesses de pénétration de l'eau à la surface d'un sol sec, jusqu'à la saturation (mm/heure)

Temps	État du sol	Vigne (sol nu)	Après blé (rotation blé-maïs)	Prairie de fétuque (3e année)
0-10 mn	sec	120	220	3 000
1-24 h	partiellement humecté	6	14	150
> 24 h	saturé	6	10	50

Le début de l'infiltration est toujours très rapide quel que soit le profil considéré. Ainsi, dans le profil sous fétuque, la vitesse d'infiltration au cours des 10 premières minutes est de 3 000 mm à l'heure, et de 50 mm/heure seulement après 24 heures, lorsque toute l'épaisseur du sol se rapproche de la saturation. A ce stade, la vitesse de pénétration de l'eau se stabilise. Les vitesses obtenues après la culture du blé et sous vigne sont nettement plus faibles, aussi bien en début d'infiltration qu'à la fin.

Dans le sol sec, l'eau pénètre sous l'action des forces de pesanteur, de pression et de succion, et l'on sait que pour un canalicule de dimension donnée, la succion joue un rôle important par rapport à la pression. Par exemple, dans un matériau homogène de quartz, dont les particules ont un diamètre compris entre 50 et 100 μ, la succion participe pour 70 p. 100 à l'avancement du front dans les 5 premiers centimètres et pour 50 p. 100 entre 5 et 10 centimètres (COURAU, 1967). Dans ces sols, où en surface, 70 p. 100 environ de la granulométrie appartiennent à des limons de 2 à 50 μ, on peut donc attribuer la rapidité de l'infiltration initiale dans la terre sèche aux forces de succion qui s'y développent, quel que soit l'état structural. La diminution de la vitesse de pénétration de l'eau à mesure que la réhumectation s'effectue, peut être attribuée à la décroissance du gradient hydraulique dû à la succion (COURAU, 1968, déjà cité). D'autres phénomènes peuvent influencer ce ralentissement, tel que par exemple, la diminution de la porosité par gonflement dans la partie réhumectée.

La figure 1 complète le tableau 3 en indiquant la profondeur atteinte par l'eau dès le début de l'infiltration. L'eau pénètre jusqu'à 70 cm en quinze minutes seulement dans le sol sous fétuque, en une heure dans celui cultivé sous blé, et il faut attendre 24 heures pour que l'eau atteigne 60 cm sous vigne. Ces différences témoignent du rôle joué par l'enracinement lors de la pénétration de l'eau vers la profondeur.

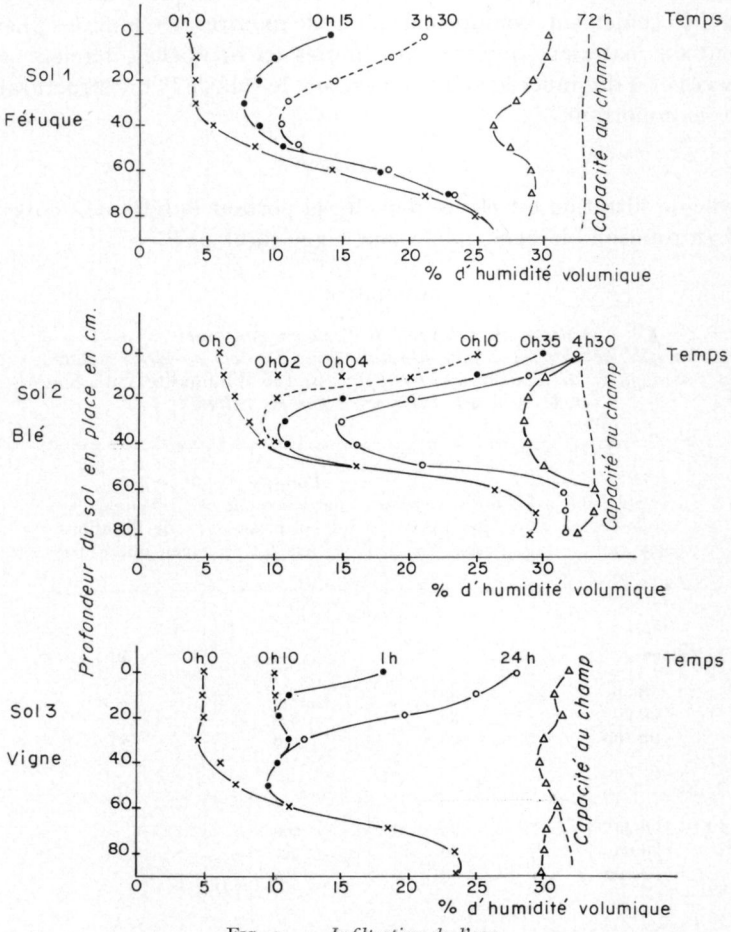


FIG. 1. — *Infiltration de l'eau*

Évolution des profils hydriques au cours du temps, jusqu'à saturation (% d'humidité volumique = mm d'eau pour 10 cm de profondeur de sol).

Des expériences réalisées sur matériaux artificiels ont montré que des canalicules fins, en communication avec de gros interstices où de l'eau circule, se remplissent rapidement sous l'action des forces de succion (COURAU, 1968). Les effets de cette succion latérale peuvent être extrêmement marqués, les distances parcourues étant de plusieurs centimètres. Dans le sol, on peut donc admettre que c'est à partir d'un réseau grossier, mis en évidence au cours de l'étude de la filtration avec l'eau chlorurée (cf. paragr. suivant), et emprunté dès le début de l'infiltration, que l'eau imbibe

ensuite la masse du sol grâce aux forces de succion latérales développées par les réseaux plus fins. Ce processus permet d'expliquer les différentes vitesses d'infiltration de l'eau vers la profondeur suivant l'intensité de la colonisation du sol par les racines, ainsi que les vitesses lentes d'imbibition au voisinage de la saturation.

Évidemment, dès que l'ensemble des pores est rempli d'eau, la succion n'intervient plus et l'écoulement n'est soumis qu'à la pesanteur et à la pression. A partir de ce moment s'établit le régime de filtration, au cours duquel toute la porosité ne participe pas à l'écoulement, comme nous allons le montrer. De plus, les phénomènes de gonflement du matériau, quoique très limités en boulbènes, tendent à rétrécir les voies d'accès et à diminuer le débit. Là encore, le rôle de l'état structural et de la culture est très important.

2. *La filtration*

La vitesse de filtration est élevée dans le sol portant la fétuque, moyenne dans celui cultivé en rotation blé-maïs, faible sous vigne (tabl. 4) (1).

TABLEAU 4

Vitesses de filtration de l'eau en mm/heure et porosité participant à cette filtration dans des sols de même nature, au voisinage de la capacité au champ (30 p. 100 d'humidité volumique) *et de structure différenciée par les cultures*

Sol profondeur (en cm)	Porosité remplie par l'eau (en %)	Porosité participant à la filtration (en %)	Vitesse de filtration (en mm/heure)
1. *Fétuque*			50
0-30	30	7,5	
30-60	30	3,0	
60-100	30	6,0	
2. *Blé*			10
0-30	30	9,0	
30-60	30	2,4	
60-100	30	1,5	
3. *Vigne*			6
0-30	30	9,0	
30-60	30	—	
60-100	30	0	

Ces valeurs sont en relation avec les données du tableau 1, c'est-à-dire avec l'état structural des parcelles et l'exploitation du sol par les racines.

Les mesures d'humidité volumique, effectuées au cours de la filtration, corres-

(1) Dans le cas de la vigne, la valeur de cette vitesse est probablement faussée par excès en raison d'un léger écoulement latéral de l'eau au niveau de l'argile par suite de la très faible pente.

pondent à une porosité globale remplie par l'eau, sensiblement égale dans tous les cas à 30 p. 100, la porosité totale de l'horizon immédiatement sous-jacent à celui travaillé variant entre 37 et 39 p. 100. Dans ces conditions, la filtration d'eau chlorurée indique la valeur absolue de la porosité « efficace » du matériau qui participe à l'écoulement. Elle est calculée à partir des différences de concentrations en chlore, de l'eau retenue par le sol après et avant introduction de l'eau chlorurée, comparativement à la concentration initiale en chlore de la solution de chlorure de calcium.

La concentration en chlore de l'eau du sol (exprimée en g de Cl pour 100 cm^3 d'eau du sol), après filtration de la solution de chlorure de calcium, est égale à :

$$\frac{\text{augmentation de la concentration en Cl du sol (en g de Cl p. 100 de terre sèche)}}{\text{humidité pondérale du sol (p. 100 de terre sèche)}} \times 100$$

Au voisinage de la capacité au champ, la porosité participant à l'écoulement de l'eau chlorurée est donc égale à :

$$\text{porosité globale remplie par l'eau} \times \frac{\text{concentration en Cl de l'eau du sol (p. 100)}}{\text{concentration en Cl de la solution (p. 100)}} = \text{porosité « efficace »}$$

Les résultats obtenus (tabl. 4) montrent que dans les horizons de surface, quelles que soient la structure et la densité d'enracinement, le tiers environ de la porosité remplie par l'eau participe à l'écoulement. Dans l'horizon de transition (30-60 cm), le dixième seulement est intéressé. Enfin, dans l'horizon profond argileux, le cinquième de la porosité contribue à l'écoulement dans le cas de la fétuque, mais cette proportion devient très faible quand le milieu est mal exploité par les racines. Ainsi, pour le sous-sol de la vigne, les dosages de chlore ne font pas apparaître de filtration d'eau chlorée. Nous avons voulu vérifier ce point et, en décapant les 60 premiers centimètres, nous avons contrôlé, selon les mêmes conditions que précédemment, la très faible perméabilité de cet horizon argileux réhumecté. Nous avons ainsi obtenu une filtration de 3 mm par jour. Cette valeur est bien faible par rapport aux 6 mm par heure que laisse filtrer la surface ; c'est pourquoi nous n'avions pu déceler d'emblée ce phénomène, nos dosages de chlore n'étant pas assez fins, par suite des faibles concentrations mises en jeu. Toutefois, cet exemple met bien en évidence la différence de vitesse de filtration entre deux horizons d'un même profil, cause d'ennoyage typique de ces sols lorsque l'eau ne trouve pas d'exutoire à ce niveau.

Dans tous les horizons de surface, bien que la porosité qui participe à l'écoulement soit très semblable, la vitesse de filtration est totalement différente d'un profil à l'autre (tabl. 4). Les dimensions et les connexions des pores présentent donc une importance primordiale.

CONCLUSIONS

Nous avions déjà vérifié expérimentalement que ces sols, pourtant qualifiés traditionnellement d'imperméables, laissaient pénétrer, en cours de réhumectation, des hauteurs de pluie atteignant 50 mm en trois jours (MARTY, 1968).

Les essais réalisés ont permis de contrôler ces données et d'observer, malgré des valeurs globales identiques de la porosité, que la vitesse de circulation de l'eau était

soumise à d'importantes variations : infiltration rapide, filtration beaucoup plus lente, écarts importants entre ces différents régimes de pénétration de l'eau suivant le type de culture.

Dans tous les cas, le pourcentage de porosité participant à l'écoulement de l'eau est relativement faible, il faut donc attribuer la quasi-totalité de la filtration aux interstices les plus grands, les plus nombreux et les mieux connectés. Ceux-ci sont représentés, le plus souvent, par les canalicules entourant les racines, qui constituent la grande majorité des réseaux de circulation préférentielle, notamment dans ces terres mal structurées et présentant peu d'aptitudes à la fissuration. Le rôle de ces réseaux s'est également vérifié au cours de l'infiltration, et des études expérimentales sur modèles ont montré qu'à partir des réseaux grossiers, l'eau pénétrait dans la masse du sol par l'action des succions latérales développées dans les petits interstices.

Il apparaît ainsi que des systèmes de cultures, susceptibles de modifier la structure grâce à l'installation de systèmes radiculaires importants, peuvent modifier dans de larges proportions la circulation de l'eau dans le sol. La création de voies de circulation préférentielle de dimension relativement importante et en assez grand nombre, constitue un réseau facilement accessible à l'eau, et permet donc sa pénétration dans le profil.

Il s'ensuit que dans les sols limoneux, instables, le système de culture revêt une importance capitale, et qu'il ne saurait être dissocié des techniques courantes d'assainissement.

Reçu pour publication en mars 1969.

SUMMARY

THE INFLUENCE OF THE CULTIVATION METHODS ON THE WATER FLOW IN AN ILL-STRUCTURED SOIL

A study of the water flow in a muddy, rather ill-structured soil in the field, has been carried out under different cultivation methods by the BÜRGER system. The water profiles have been established with the help of a neutrons humidimeter. In filtration conditions, the suction strengths play a primordial part. In filtration conditions, the part played by the porosity ratio in the flow seems to be less important than the size of the pores and their connections. The preferential circulation systems, that is, the channels surrounding the roots, are responsible in a great measure for the water flow. So, the cultivation method wich is liable to create more or less vigorous rootings and to alter the structural properties is of the greatest importance in unstable soils water penetration and circulation.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS DES BODENNUTZUNGSSYSTEMS AUF DEN WASSERABFLUSS IN EINEM SCHLECHT STRUKTUIERTEN BODEN

Der Wasserabfluss in einem gewachsenen, lehmigen Boden mit schlechter Struktur wurde für verschiedene Bodennutzungssysteme mittels der Methode von BURGER untersucht. Die hydrolytischen Profile wurden mit Hilfe eines Neutronen-Feuchtigkeitsmessers aufgestellt. Im Falle Versickerungen, spielen die Saugkräfte eine wesentliche Rolle. Im Falle von Filtrationen, scheint

der Anteil der am Abfluss beteiligten Bodenporosität weniger wichtig zu sein als die Abmessungen der Poren und ihrer Bindeglieder. Die bevorzugten Umlaufsnetze, d. h. die kleinen Kanäle, die die Wurzeln umpassen, sind grösstenteils verantwortlich für den Wasserabfluss. Demnach gewinnt das Bodennutzungssystem, das imstande ist, mehr oder weniger kräftige Wurzeln zu schaffen und die Eigenschaften der Strukturbildung zu verändern, in unbeständigen Böden eine ausschlaggebende Bedeutung für das Eindringen und den Umlauf des Wassers.

Влияние различных систем культуры на стекание вод в слабо оструктуренной почве.

Ж. Р. МАРТИ, МАРИЕЛЬ КУРО.

РЕЗЮМЕ

Авторы изучали на месте, с помощью метода Бюргера, стекание вод при различных системах культуры, в суглинистой слабо оструктуренной почве. Определение профилей влажности было проведено при помощи нейтронного влагомера. Всасывающие силы играют ведущую роль при режиме впитывания. При режиме фильтрации пропорция порозности принимающая участие в процессе стекания имеет, как-будто, меньшее значение чем размеры пор и их связи. В этом случае сети предпочтительного передвижения влаги, состоящие из небольших каналов окружающих корни, обуславливают главным образом стекание вод. Таким образом, выбор системы культуры способной содействовать созданию более или менее могучих корней, и тем самым, изменению свойств структуры, играет в непрочных почвах главенствующую роль в облегчении проникновения влаги в почву и ее передвижения в ней.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHARLOT, 1961. *Les méthodes de la chimie analytique.* 1.024 p. Masson et Cie. éd., Paris.

COLLIS-GEORGE N., HENIN S., KELLY J. A., 1963. Étude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **273**, 242-244.

COURAU M., 1967. Modalités de l'infiltration de l'eau dans un milieu poreux : effet de la force de succion. *C. R. Acad. Sci.*, **265**, série D, 862-865.

COURAU M., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans des milieux poreux artificiels. *Ann. agron.*, **20**, 1, 5-14.

DUCHAUFOUR P., 1960. *Précis de pédologie.* Masson et Cie, éd., Paris, 1 vol.

MAERTENS C., 1964. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement radiculaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Sci. Sol*, 2.

MARTY J.-R., 1968. *Contribution à l'étude des boulbènes* (thèse en cours de publication).

Ann. agron., 1969, **20** (4), 371-433.

ÉTUDE DES EFFETS RÉSIDUELS DES CULTURES FOURRAGÈRES SUR LES CULTURES ARABLES

I. — Effets résiduels de la Luzerne sur le Blé et le Maïs

P. JACQUARD, L. CROISIER, et G. MONNIER *
avec la collaboration technique de C. JEANDET

Station d'Amélioration des Plantes fourragères, 86 - Lusignan
** Laboratoire des sols,*
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

En préliminaire à une série d'articles consacrés à l'étude des effets résiduels des cultures fourragères, les problèmes posés par ce thème sont passés en revue sous forme d'une bibliographie des travaux publiés, ceci afin de situer les études engagées à la Station d'Amélioration des Plantes fourragères de Lusignan. Des résultats relatifs à un essai sur les effets de la luzerne comme précédent à des cultures de blé et de maïs sont ensuite donnés et commentés. L'exportation d'azote, par trois cultures successives (ne recevant pas d'azote) derrière luzerne est de l'ordre de 190 kg/ha. En annexe, le milieu d'observation et la méthodologie (protocoles expérimentaux et techniques de réalisation) sont décrits.

AVANT-PROPOS

Le mémoire de MM. JACQUARD, CROISIER et MONNIER, que la rédaction des *Annales agronomiques* présente dans cette livraison à ses lecteurs, est le premier d'une série consacrée à l'influence sur le milieu et sur les cultures suivantes, de l'introduction de cultures fourragères dans la rotation. Il s'agit de l'analyse de très importants dispositifs expérimentaux mis en place à partir de 1961 à la Station de Lusignan par des chercheurs du Département d'Amélioration des Plantes.

Cette analyse a été effectuée, pour une part, en relation avec des chercheurs du Département d'Agronomie. Une telle collaboration entre les spécialistes de la plante et ceux de l'écologie a permis d'aborder, d'une façon plus précise, le problème des interactions réciproques entre le végétal et son support, le sol. C'est là une question passionnante. En effet, la spécialisation, résultant du développement de nos connaissances, conduit trop souvent à n'envisager qu'un aspect de ces problèmes, alors qu'au

niveau de la pratique ils sont indissociables et se confondent d'ailleurs quand il faut évaluer le rôle du précédent ou le choix de la culture suivante dans une rotation, ou les complimentarités dans le cadre d'un sytème de culture. Toutefois, si les lecteurs peuvent trouver dans l'exposé de ces résultats des informations ou des précisions concernant ces questions, certaines resteront encore sans réponse. En effet, les auteurs ont bien prévu la mise en place d'un dispositif expérimental répondant aux exigences de la statistique, qui assure par voie de conséquence que la signification des résultats a pu être calculée, mais l'analyse des effets est restée nécessairement incomplète. Par exemple, l'étude des courbes de croissance montre que certains rendements mesurés peuvent être attribués à une action de l'azote, par contre, l'étude de la minéralisation de cet élément n'ayant pas été prévue suffisamment tôt, on ne dispose pas de confirmations directes de l'hypothèse induite par l'observation du comportement des plantes. Il n'en reste pas moins, malgré ces réserves, que la masse considérable d'informations recueillies et que leurs qualités apporteront des données solides aux techniciens qui ont la mission de guider les agriculteurs. C'est dans cet espoir que nous sommes heureux de diffuser dans le public, grâce à ces *Annales*, le résultat d'un travail qui porte sur plus de 500 parcelles expérimentales.

S. H.

Le présent mémoire, premier d'une série d'articles consacrés aux effets résiduels des cultures fourragères, consiste en :

1. Une revue des données déjà acquises et des problèmes en suspens, suivie d'une présentation succincte des protocoles expérimentaux ;
2. la description d'une expérience sur les effets de la luzerne ;
3. une définition du cadre écologique dans lequel les variables ont été mesurées ainsi que la méthodologie expérimentale (difficultés rencontrées et solutions techniques apportées).

I. — INTRODUCTION : ÉNONCÉ DU PROBLÈME

Le but fondamental de toute agriculture étant d'obtenir la production la meilleure, l'un des moyens pour y arriver sera la détermination de l'ordre de succession des différentes plantes cultivées aboutissant à la valeur optimum de l'ensemble des récoltes. C'est là tout le problème des rotations (SÉBILLOTE, 1966).

Or, sous une végétation maintenue herbacée pendant plusieurs années, la terre « se repose », d'autant plus que la production fourragère est peu importante, ou bien, tout au contraire, que la prairie est bien fertilisée. Ce fut, d'ailleurs, initialement, un des rôles dévolus aux luzernières, puis aux prairies temporaires, que de rendre productif ce repos. Ainsi les cultures fourragères eurent-elles longtemps deux objets :

— restaurer la capacité de production ;

— et, par l'intermédiaire des animaux qu'elles nourrissaient, fournir du fumier pour les terres, assurant ainsi un véritable transfert de fertilité de la surface couverte d'herbe vers les surfaces annuellement labourées.

Le potentiel du sol peut donc se trouver augmenté lorsque des cultures fourragères sont incluses dans les rotations de cultures arables ; mais l'importance des

problèmes soulevés par cette pratique a justifié, au sein du groupe de travail « Plantes fourragères » de l'I. N. R. A., la création d'une section spécialisée dans l'étude de ses aspects (JACQUARD, 1964) :

1. théoriques, par le biais d'une analyse approfondie des effets résiduels ;
2. pratique, et, en particulier, des modalités de retournement.

L'essentiel des réflexions de cette section, au cours des dernières années, a porté sur les points suivants : modifications des sols sous prairies, variations de l'intensité des effets résiduels, retournement des prairies, manifestations et durée de leurs effets. Un point important et qu'il convient de souligner est la distinction nécessaire à faire entre les effets résiduels directs et la manifestation de ces effets au travers des plantes cultivées par la suite.

1. *Les effets résiduels des cultures fourragères* se manifestent indirectement sur le rendement des cultures suivantes, au travers de *modifications de l'état des sols sous prairies*, dont les plus importantes ont trait : à la matière organique (répartition, état), à la structure, au niveau d'azote ou au bilan chimique de certains autres éléments. Dans la majorité des conditions françaises, les effets au niveau du régime de l'eau et de l'équilibre biologique sont d'ordre plus mineur.

a) *La matière organique.*

La teneur en matières organiques totales est très probablement la caractéristique du sol affectée de la façon la plus sensible et la plus générale sous prairie.

Son accroissement tient d'abord à une diminution du taux annuel de minéralisation en l'absence de tout travail du sol mais surtout à l'apport considérable que constituent les racines, en particulier des graminées fourragères.

Aussi, pour rendre compte d'une façon précise du mécanisme de l'enrichissement du sol, est-il nécessaire de distinguer une fraction organique libre, essentiellement composée, dans le cas qui nous occupe, de racines vivantes ou mortes mais encore peu décomposées et une fraction plus évoluée liée à la partie minérale du sol (MONNIER, 1958). La première fraction à C/N élevé susceptible d'une évolution relativement rapide est souvent à l'origine des blocages d'azote pouvant entraîner des effets dépressifs sur les cultures suivantes. Son évolution peut aussi, lorsque les conditions de milieu sont défavorables, provoquer l'apparition de phénomènes de formation de gley.

La deuxième fraction, plus liée à la partie minérale, modifie de ce fait les propriétés physico-chimiques du milieu et par sa minéralisation contribue à la fourniture d'éléments minéraux (azote principalement).

b) *La structure.*

L'état structural peut être apprécié en place par l'examen du profil cultural (HÉNIN et coll., 1960). Son évolution sous prairie est caractérisée par la « granulation » c'est-à-dire l'apparition d'éléments structuraux polyédriques ou arrondis dont la dimension moyenne régulière semble liée à la densité radiculaire (BUI HUUTRI, 1968). Cette granulation qui, dans certaines conditions liées à la texture du sol principalement, peut apparaître assez rapidement après l'implantation de la prairie (cinq mois, ANDREW, 1965) est accompagnée ou suivie d'un accroissement de la stabilité structurale traduisant la résistance des éléments structuraux au délitement sous l'action de l'eau (MONNIER, 1965). Il y a donc à la fois une action sur l'acquisition d'une structure et une action sur la stabilité de cette structure.

De telles actions semblent principalement le fait des graminées, au moins si l'on se place avant le retournement de la prairie. Cependant, certaines expériences montrent que l'incorporation de luzerne (MILLER et WEMPER, 1962) peut avoir un effet voisin sinon identique. Un aspect important est lié à la répartition de l'action dans le profil.

c) *Les modifications des propriétés chimiques concernent surtout le niveau d'azote* ; mais le bilan de certains éléments comme le phosphore et le potassium peut être notablement perturbé, particulièrement en prairies fauchées.

De nombreux travaux sur ces effets au point de vue chimique, ont été réalisés à Rothamsted. Le pâturage mobilise les éléments nutritifs du sol et les concentre au voisinage de la surface (RUSSEL, 1960 ; WILLIAMS et DONALD, 1957 ; WILLIAMS et LIPSETT, 1960 ; WILLIAMS et STEINBERGS, 1958). En ce qui concerne le niveau de l'azote, on a trouvé que, sous pâture, il augmente pendant 200 ans, mais que dès la 25e année, la moitié de la teneur plafond est atteinte.

Mais cet enrichissement en azote est surtout le fait des légumineuses et sa mesure a été réalisée dans le cadre des expériences, objets de la présente série de publications à l'aide d'un dispositif comportant, après quelques années de différenciation du sol par des cultures arables sans azote et un « repos » sous culture de luzerne, des cultures-tests à différents niveaux de fertilisation azotée. C'est cet enrichissement qui explique en grande partie les meilleurs rendements obtenus derrière légumineuses (pure ou associée à une graminée) (tabl. 1).

TABLEAU I

Rendements en blé obtenus derrière différents précédents fourragers
(E. N. S. A. Grignon, 1961)

Précédent (durée : 3 ans)	Rendements en blé (q/ha) (1)
Dactyle + luzerne	54,8
Luzerne	52,5
Dactyle	45,7
P.p.d.s.	4,7

(1) Fertilisation azotée :
le 13-3 : 70 N (sauf sur dactyle : 100 N)
le 14-4 : 40 N

Le niveau de fertilité est donc élevé par les légumineuses (C. S. I. R. O., 1963) et le taux d'accumulation de l'azote a pu être estimé ; mais si la plupart des travaux, dans ce domaine, soulignent l'enrichissement en azote organique, celui-ci n'est pas toujours et non nécessairement aisément minéralisable. Or, c'est la fraction la plus facilement minéralisable de cet élément qui jouera un rôle déterminant à court terme. A ce point de vue, pour des sols provenant de prairies, des incubations, à niveau d'humidité constant, pendant quatre à cinq semaines à environ 30° C, four-

nissent des résultats satisfaisants (DROUINEAU et LEFÈVRE, 1949 ; CLEMENT et WILLIAMS, 1962).

d) *L'étude du régime hydrique sous prairie montre qu'il existe une possibilité d'effet résiduel pour cette caractéristique :*

— épuisement ou assèchement dû à un précédent luzerne suivi d'un hiver sec sans possibilité de reconstitution des réserves ;

— accroissement de la capacité d'emmagasinement par diminution du ruissellement ou de la réserve utile par approfondissement du profil d'enracinement.

e) *Enfin, la faune et la microflore du sol, ainsi que le spectre botanique des adventices, peuvent être affectés.*

2. *Les variations d'intensité des effets* jouent aussi bien au point de vue chimique que physique. C'est ce qui ressort, en particulier, d'une étude de structure dans une gamme étendue de sols prairiaux (LOW, 1955). Les facteurs de variation sont :

a) *La nature de la prairie* : le type de plante fourragère est un élément déterminant. Ainsi les poids de résidus peuvent varier de 65,7 q/ha pour un trèfle blanc pâturé à 83, 5 pour une luzerne et même 93,8 pour un ray-grass (HEARD, 1956). C'est pourquoi un groupe d'expériences, en cours ou terminées, a été implanté sur ce sujet et, notamment, une comparaison : graminée (DACTYLE) et légumineuse (TRÈFLE BLANC), pures et associées. On peut espérer pouvoir de cette manière séparer les effets « structure » et « azote » propres à chaque espèce et évaluer le bilan de l'azote dans un premier temps ; par la suite, le même dispositif avec des variations systématiques de la composition de l'association devrait permettre de mieux cerner le problème. L'espèce de graminée joue un rôle vis-à-vis de la teneur et du type d'enrichissement en matière organique du sol et de la stabilité structurale (MONNIER, 1957), aussi important que celui des méthodes d'exploitation, qui sera envisagé plus loin. Ainsi le Ray-grass anglais agit différemment du Dactyle (MONNIER, 1965). Les mélanges d'espèces seraient plus efficaces que la culture d'une espèce pure (WEHRLI, 1958) ; un gazon constitué par un mélange de graminées aurait un effet plus bénéfique sur la structure du sol qu'une culture pure d'une graminée (KOBLET et WEHRLI, 1959).

b) *Sa durée* : dans les régions tempérées, on a constaté que l'évolution des profils est lente. Ce n'est qu'au bout de trois ans que les horizons commencent à se différencier (CLEMENT et WILLIAMS, 1959 ; MONNIER, 1965) d'une façon sensible sur sol de limon. Si les effets résiduels sont dépendants de la durée de la prairie, il en est de même de leurs manifestations (LEWIS et coll., 1960), lesquelles lui sont proportionnelles (tabl. 2). De même, après trèfle, le gain de rendement en grain d'un blé, dû à l'accumulation d'azote, est de 140 kg/ha/année sous prairie (C. S. I. R. O., 1961 *a*). En pratique, l'effet résiduel maximum est obtenu après une durée de prairie égale à la durée de la séquence arable (HOOD, 1960), ce qui peut paraître simpliste et n'exclut pas la recherche de facteurs d'explication plus généraux. A l'irrigation, matière organique et azote du sol ne sont stabilisés que par de longues séquences fourragères (trois ans de luzerne, par exemple (DUBETZ, 1964)). Pour atteindre à nouveau l'état trouvé sous prairie naturelle, il faut dans certains sols, quatre années, mais, dans d'autres, 50 ! Enfin, si trois années de prairie maintiennent la structure d'un sol léger, cette régénération est ralentie en sol lourd.

TABLEAU 2

Gain de rendement d'un blé en fonction de la durée de culture d'herbe (LEWIS et coll., 1960)

	Gain de rendement d'un blé (q/ha) par rapport à un témoin
Après { 1 an / 3 ans } de culture d'herbe	+ 11,0 + 18,5

c) *Son système d'exploitation*

La pâture, l'affouragement, la constitution de réserves ou la production de semences sont autant de destinations des cultures fourragères. Dans le cas du Ray-grass anglais, on possède des données (MONNIER, 1958) montrant que le rythme d'exploitation influe sur l'enracinement, le phénomène étant beaucoup moins marqué sur Dactyle. Les résidus sont concentrés dans les premiers centimètres du sol après un régime de coupes fréquentes contre 10 cm en coupes espacées. L'enracinement est encore plus profond sous culture porte-graines.

L'effet bénéfique des graminées peut-être contrebalancé, dans le cas du pâturage, par apparition d'une couche tassée proche de la surface.

C'est pourquoi les comparaisons suivantes sont intéressantes à réaliser et le sont ou l'ont été :

pâturage-affouragement ;
affouragement-production de semences ;
pâturage-fenaison.

3. *Les modalités de retournement constituent un facteur important.* D'un point de vue chronologique, les premières répercussions à se manifester ont trait à la décomposition des résidus, notamment des fragments végétaux. En conditions favorables, après quatre mois, certains peuvent être encore verts. La minéralisation de l'azote, et même l'ensemble de l'humification serait d'ailleurs plus rapide en sols vierges qu'en sols cultivés (MORTENSEN, 1963). Une certaine phytotoxicité peut se manifester : certains résidus déterminant des retards à la levée (avec des répercussions sur le rendement de la culture suivante).

Enfin, une modification artificielle du rapport C/N est parfois souhaitable (dans la mesure où une valeur satisfaisante n'a pas été obtenue par application d'une certaine politique de fumure et d'exploitation de la prairie (TROUGHTON, 1958).

C'est pourquoi plusieurs types de traitements peuvent être comparés, tels que :

a) *Le labour.*

Les conditions d'enfouissement d'une prairie influent certainement sur la décomposition. Labour dressé de début d'été et fermé de début d'automne seront susceptibles d'avoir des effets différents, vis-à-vis des accidents par asphyxie (MONNIER, 1958).

b) *La chaux.*

Les microbes nitrificateurs et les Azotobacter ne sont vraiment actifs qu'à

pH élevé; le chaulage permet donc d'activer la vie microbienne et d'entraîner une minéralisation plus rapide, tout en assurant un certain effet tampon.

c) *L'apport d'azote.*

Cet élément peut contribuer à abaisser le rapport C/N et pallier une carence temporaire (on rapprochera ces études de celles entreprises à Hurley sur l'incorporation de paille pour augmenter le terme C du rapport (WILLIAMS, 1964). L'apport peut donc favoriser la nitrification.

4. *La principale manifestation des effets résiduels consiste dans leur action sur le rendement des cultures.* Sa mise en évidence est réalisée au moyen de plantes-tests dont les plus utilisées sont les céréales.

L'amélioration des propriétés physiques, structure et stabilité structurale, est susceptible de se manifester d'une façon bénéfique dans la plupart des périodes où les conditions climatiques sont défavorables (excès d'eau en hiver, pluies battantes au moment du semis, sécheresse d'été). Cette action est toutefois plus sensible au cours de l'établissement de la culture qui suit la prairie. L'évolution de la fraction azotée de la matière organique peut être bloquée à l'automne, et entraîner une malnutrition azotée des jeunes semis ; cependant, son action prédomine surtout pendant la végétation plus spécialement au printemps. Les réserves hydriques agiront surtout sur les cultures estivales. Cette différence de réaction suivant l'époque de croissance nous a conduit à subdiviser chaque parcelle en deux parties, l'une portant comme culture-test une céréale d'hiver (blé), l'autre un maïs.

Les chercheurs anglais trouvent, dans la majorité de leurs expériences, une liaison entre le rendement et le niveau d'azote minéralisable après prairie (WILLIAMS, 1959), alors que l'amélioration de la stabilité y marque peu. Ceci peut s'expliquer, soit par la bonne structure de leurs sols, ceux de Rothamsted, par exemple (BOYD et coll., 1961), soit par la présence de légumineuses, entraînant une fixation abondante d'azote, élément qui s'accumule au bénéfice de la culture (certains résultats montrent que le rendement d'un blé est proportionnel au pourcentage de légumineuses) et aussi parce que leurs résidus sont plus riches en eau et généralement plus faciles à dégrader, soit par la faiblesse des fertilisations azotées sur les cultures.

Pour l'ensemble de la France, l'optimum de la fertilisation azotée, pour les blés de légumineuses, se situe à environ 20 unités de moins que pour les blés venant derrière d'autres cultures : en 1966, 105 unités/ha contre 123 pour les autres précédents ; en 1967, 120 contre 135 (N., 1968), la différence pouvant aller jusqu'à 50 unités, dans certains cas, après luzernière.

5. *La durée des effets résiduels est variable.* L'appréciation globale de leur persistance est réalisable par l'enregistrement de l'évolution, jusqu'à décroissance, des rendements de séquences de cultures arables. Au fur et à mesure de la succession des cultures, la teneur du sol en matière organique diminue pour se stabiliser à un niveau plancher. Cependant, des différences entre précédents, portant sur le rendement des cultures suivantes, peuvent persister longtemps en sol lourd, ceci étant dû au niveau d'azote du sol plutôt qu'à tout autre facteur (HANLEY *et al.*, 1964), aspect physique ou aération.

6. *Description des dispositifs : résumés des protocoles expérimentaux.* Arrivé à ce point de l'exposé, il ne semble pas inutile de préciser la place prise par les études sur les effets résiduels dans l'organisation du Laboratoire des Techniques culturales et Assolements fourragers de la Station de Lusignan, afin d'indiquer l'esprit dans lequel elles ont été entreprises. Les expériences dont il sera question sont ou ont été implantées sur le Domaine expérimental des Verrines, dévolu entièrement aux activités du Laboratoire, lequel est chargé des recherches sur l'ensemble des problèmes complexes posés par la production fourragère :

— évaluation des variétés en cours d'*obtention* ou déjà *commercialisées* ;

— mise au point de *techniques culturales* au niveau variétal puis à celui des associations graminée-légumineuse ;

— intégration de ces *techniques* dans les *rotations* ;

— transposition de l'échelle expérimentale à celle de la grande culture, en présence d'animaux, afin d'obtenir des informations sur les problèmes posés au chercheur et au vulgarisateur par le passage en vraie grandeur.

Il s'agit d'un service de recherches pouvant constituer un point de rencontre entre les *disciplines intéressées* à la *production végétale* et celles concernées par la *production animale*, c'est-à-dire entre les disciplines agronomiques (génétique, physiologie, agronomie, pédologie, bioclimatologie) et zootechniques (nutrition, élevage).

Les études sur les rotations y sont un élément important des synthèses au niveau du système biologique constitué par chacun des ensembles : sol, plante, animal.

Le tableau 3 donne la liste des expérimentations de recherches en cours ou terminées, suivies à la Station d'Amélioration des Plantes fourragères de Lusignan ; chaque thème de travail y est numéroté pour faciliter la citation des références dans le texte. Leur choix visait à obtenir des réponses précises aux questions évoquées dans l'introduction :

- nature des effets résiduels des cultures fourragères ;
- variation de leur intensité et de leur persistance ;
- modalités de retournement des prairies ;
- manifestation des effets.

TABLEAU 3

Liste des expériences en cours ou terminées implantées à la Station d'Amélioration des Plantes fourragères de Lusignan

Essai nº 1. — Comparaison des résultats obtenus en parcelles expérimentales et en parcelles de grandeur normale.

Essai nº 2. — Effets cumulatifs des prairies et mesure de la durée de l'effet résiduel.

Essai nº 3. — Fourniture d'azote par la luzerne.

Essai nº 4. — Effets résiduels de différents précédents fourragers.

Essai nº 5. — Modalités de retournement d'une prairie de dactyle + trèfle blanc, pâturée.

Essai n. 6. — Introduction de la prairie dans une rotation triennale.

C'est pour poser clairement ces questions, aussi bien que pour trouver les dispositifs propres à y répondre et pour élaborer les techniques permettant de décrire avec le maximum de précision et le minimum de biais les phénomènes observés, qu'une méthodologie expérimentale adéquate a été appliquée.

Les essais sur les effets résiduels étant implantés pour un grand nombre d'années, la conception des dispositifs et l'élaboration des protocoles représentent des points délicats pour lesquels toute erreur peut entraîner l'annulation d'un travail de longue durée. C'est pourquoi il a paru utile de donner ici une description détaillée des six dispositifs à l'aide desquels les études sont ou ont été réalisées à Lusignan, description accompagnée d'une présentation sommaire des protocoles, lesquels seront exposés *in extenso* en tête de chaque chapitre particulier.

La mise en place d'expériences sur les rotations comporte un certain nombre de problèmes spécifiques non rencontrés dans les expérimentations annuelles (YATES, 1949). Ainsi, elle permet de mesurer différents types d'effets :

— *des effets directs* d'un traitement (réponse à ce traitement l'année de son application) ;

— *des effets résiduels* de première, deuxième année, etc. ;

— *des effets cumulatifs*, définis comme la différence de rendement une année donnée due à l'application répétée d'un traitement ou d'un cycle de traitements. Ces effets peuvent tendre vers une valeur stable si le traitement est prolongé suffisamment longtemps : on peut alors les définir comme des *effets limites*.

D'autre part, on peut ordonner *les expériences agronomiques par ordre croissant de complexité* de la façon suivante :

— *expériences annuelles* (elles comportent une seule culture et un seul ensemble de traitements) ;

— *expériences annuelles avec étude des effets résiduels* (ce ne sont qu'une extension des expériences annuelles) ;

— *expériences sur les cultures pérennes* (*ou sur la même culture annuelle cultivée année après année*), les traitements supportés par des parcelles identiques pouvant varier d'une année à l'autre ;

— *expériences sur une rotation* (comme précédemment les traitements peuvent varier d'une année à l'autre) ;

— *expériences de comparaison des effets de différentes rotations* (ici, différentes cultures elles-mêmes agissent en tant que traitements).

Un certain nombre de problèmes statistiques sont propres à la conception et à l'analyse des expériences cycliques à long terme destinées à comparer différentes rotations culturales (PATTERSON, 1964). De ce point de vue, les types de dispositifs que l'on peut distinguer, relativement à leurs propriétés, sont :

— les dispositifs de base comportant toutes les phases des rotations dans chaque bloc (c'est le cas de tous les essais dont il sera question ici) ;

— les dispositifs réduits comportant des groupes de phases mutuellement exclusifs répartis dans des blocs séparés ;

— les dispositifs à phases confondues dans lesquels certaines comparaisons entre cultures tests sont partiellement confondues dans les différences entre blocs.

L'analyse des rendements des cultures-tests se fait par estimation des effets

moyens des rotations indépendamment des années et par des régressions sur les variables saisonnières ou de temps. Cette analyse est compliquée par l'existence de corrélations entre les valeurs de rendement recueillies sur des parcelles identiques et l'absence d'homogénéité des variations résiduelles d'une année à l'autre dans les effets rotations. L'estimation des erreurs est donc un point important ainsi que les pertes d'informations dues à l'utilisation de moyennes non pondérées et de régressions ignorant les corrélations, mais des méthodes existent pour récupérer cette information.

Nous examinerons ici, successivement, des essais portant sur les effets résiduels puis des essais ayant trait à des effets cumulatifs, comportant les uns et les autres la comparaison d'une ou plusieurs rotations (1).

a) *Essais sur les effets résiduels.*

Influence des modalités de retournement d'une prairie sur les performances d'un blé et d'un maïs (2).

Dans ce dispositif, le comportement de deux cultures arables différentes est observé et mesuré, parallèlement à une étude de l'évolution de la matière organique et de la nitrification. La phase préparatoire a consisté en une culture de dactyle + trèfle blanc, exploitée par pâturage ou fauche de 1963 à 1965 inclus, les plantes-tests étant par la suite du blé et du maïs, destinées à révéler l'action de traitements, au retournement de la prairie, s'établissant ainsi :

Dates de retournement	Azote (kg/ha)	
	au retournement	au semis de la culture-test
Juin (après les deux premières coupes)	0	0
		50
	50	0
		50
Fin août-début septembre (après les trois ou quatre premières coupes)	0	0
		50
	50	0
		50

Le retournement était réalisé par un passage rapide de rotovator, avec carter abaissé suivi d'un deuxième passage, à 10 cm, lent, carter relevé, un labour étant effectué à l'automne.

(1) S. HÉNIN, actuellement chef du Département d'Agronomie de l'I. N. R. A., a participé au premire tri préliminaire des grands thèmes généraux d'expérience.

(2) G. LEFÈVRE, Directeur de la Station d'Agronomie d'Amiens, a collaboré au déroulement de la phase d'évaluation de cet essai.

Il y avait donc 8 traitements, répétés 6 fois, selon une disposition factorielle.

La prairie avait été conduite selon des modalités d'exploitation précises qui seront décrites lors de la présentation des résultats.

Cet essai, à proprement parler, porte en fait sur la modification de l'effet résiduel d'une prairie sous l'action des techniques culturales.

Effets résiduels de la luzerne sur le blé et le maïs.

Il s'agissait, ici, de mesurer l'effet de « fourniture » d'azote pendant trois ans sur des cultures-tests, après trois ans d'une phase préparatoire, comportant quatre traitements différentiels :

Années	Traitements			
	1	2	3	4
1962	M_0	M_0	M_0	L
1963	M_0	M_0	M_0	L
1964	M_0	M_0	M_0	L
1965	M_{50} B_{50}	M_{100} B_{100}	M_{150} B_{150}	M_0 B_0
1966	B_{50} M_{50}	B_{100} M_{100}	B_{150} M_{150}	B_0 M_0
1967	A_0	A_0	A_0	A_0

M = Maïs, L = Luzerne, B = Blé, A = Avoine (l'indice indique la dose d'azote).

Effets résiduels de différents précédents sur des séquences de cultures arables.

Dans cet essai, il s'agissait de comparer l'action sur le rendement des plantes-tests, de cultures fourragères de même durée mais de nature différente. Six traitements ont été comparés :

Années	Traitements					
	1	2	3	4	5	6
1962	D	D + Tb	Tb	Dg	M	M
1963	D	D + Tb	Tb	Dg	B	B
1964	D	D + Tb	Tb	Dg	O	O
1965	MB	MB	MB	MB	MB	MB
1966	BM	BM	BM	BM	BM	BM
1967	A	A	A	A	A	A

D = Dactyle pur, fauché au rythme pâture ; D + Tb = Dactyle + Trèfle blanc, au rythme pâture ; Tb = Trèfle blanc pur, au rythme pâture ; Dg = Dactyle en production de graines en 1963 et 1964 ; O = Orge ; M = Maïs ; B = Blé ; A = Avoine.

En phase préparatoire, une différenciation des niveaux de fertilisation azotée fut superposée à celle obtenue à l'aide des types de « cultures » telle que les apports annuels ont correspondu aux niveaux (kg/ha/an) :

200 pour le traitement 1
150 pour le traitement 4
100 pour les traitements 2 et 6
0 pour les traitements 3 et 5

D'autre part, chaque variable fut implantée en double afin de pouvoir conduire les cultures-tests à deux niveaux de fertilisation azotée : 0 et 100 kg/ha.

Le dispositif étant de type factoriel, on pouvait espérer ainsi réaliser une analyse approfondie des effets et interactions.

b) *Essais sur les effets cumulatifs.*

Les dispositifs correspondant à ces expériences sont caractérisés par l'implantation, en début d'essai puis chaque année, de toutes les phases de chaque rotation comparée.

Étude globale des effets résiduels et de leur durée.

Le but, ici, est d'obtenir des informations concernant les effets cumulatifs comparés de prairies de nature et de durée (deux ou quatre ans) variables ainsi que d'évaluer la persistance des effets d'une prairie de quatre ans.

L'essai comprend cinq rotations totalisant 24 phases et correspondant aux traitements ci-dessous :

Rotations :	1	2	3	4	5
	M	M	P_1	P_1	P_1
	B	B	P_2	P_2	P_2
			M	P_3	P_3
			B	P_4	P_4
				M	M
				B	B
					M
					B
					M
					B

Dans la rotation 1, le maïs reçoit du fumier et tous les résidus aériens sont enfouis ; par contre, dans la rotation 2, il n'y a pas d'apport de fumier, et tous les résidus aériens sont exportés.

La prairie de deux ans est un Ray-grass d'Italie + Trèfle violet et celle de quatre ans un Dactyle + Luzerne, recevant toutes deux 100 kg d'azote/ha/an.

Introduction de la prairie dans une rotation triennale.

Il s'agit là d'étudier les effets cumulatifs de l'introduction dans une succession de trois cultures arables d'une prairie de 3 ans, exploitée en fauche ou en pâture.

L'essai comprend trois rotations (15 phases) correspondant aux successions ci-dessous :

Rotations :	1	2	3
	PT	P_1	F_1
	B	P_2	F_2
	O	P_3	F_3
		PT	PT
		B	B
		O	O

PT = Pommes de Terre
$P_{1\text{-}3}$ = Prairie pâturée
$F_{1\text{-}3}$ = Prairie fauchée

Les pommes de terre ne reçoivent du fumier que dans la rotation 1. La prairie est une association Ray-grass hybride + Trèfle blanc *Ladino*, effectivement pâturée par des vaches laitières dans la rotation 2, coupée au stade convenable pour la conservation dans la rotation 3.

Micro-unité d'exploitation.

Le domaine expérimental des Verrines comporte une *unité d'exploitation* de 60 ha dont la moitié est consacrée à des cultures fourragères. Chaque parcelle élémentaire de 3 ha y comprend, lorsqu'il s'agit de ces dernières cultures, deux *variantes-semis* (S) et deux *variantes-exploitation* (E), correspondant le plus souvent à une confrontation pâture — affouragement en vert, suivant le schéma ci-dessous :

S_1 E_1 0,75 ha	S_2 E_1 0,75 ha
0,75 ha S_1 E_2	0,75 ha S_2 E_2

Des données peuvent donc y être recueillies à l'échelle agricole mais avec un contrôle limité de la variabilité.

La micro-unité d'exploitation est une représentation à échelle réduite de l'assolement de grande culture. Chaque parcelle de 3 ha y correspond à une parcelle principale de 200 m² et se retrouve, distribuée au hasard, dans 4 blocs. Chaque *variante* *Si Ei* constitue une sous-parcelle de 50 m² répartie au hasard. On a donc affaire à un dispositif en parcelles subdivisées (*split-plot* des Anglo-Saxons).

On peut ainsi comparer les informations obtenues dans l'un et l'autre système, aussi bien au point de vue des productions fourragères qu'à celui des cultures arables.

La rotation culturale appliquée de 1961 à 1967 est donnée dans le tableau ci-après.

S'agissant d'un essai portant sur les effets résiduels cumulatifs des plantes fourragères et afin d'éviter les effets *année*, chaque phase de la série de culture est semée chaque année. Il y a donc 20 parcelles principales de 200 m² par bloc.

Année	Culture
1 }	
2 }	Prairie de 4 ans (Luzerne + une Graminée)
3 }	
4 }	
5	Maïs
6	Blé
7	Orge
8	Fourrage annuel d'hiver (Seigle par ex.) suivi d'un fourrage annuel d'été (Sorgho par ex.)
9	Maïs
10	Blé
11 }	
12 }	Prairie de 3 ans (une Graminée avec ou sans Trèfle blanc)
13 }	
14	Maïs
15	Blé
16	Orge
17 }	Prairie de 2 ans (Ray-grass d'Italie ou hybride avec ou sans Légumineuse)
18 }	
19	Maïs
20	Blé

7. *Conclusions.* Les effets résiduels des cultures fourragères se manifestent par l'intermédiaire de modifications de l'état des sols sous prairies, portant sur la matière organique, la structure, les propriétés chimiques (surtout le niveau d'azote), éventuellement le régime hydrique. Leur principale conséquence agronomique réside dans les variations du rendement des cultures arables qui en découlent. L'intensité de ces effets dépend beaucoup du système de production dans lequel on se trouve, mais aussi de caractéristiques propres aux soles fourragères (nature botanique des prairies, durée, système d'exploitation, modalités de retournement). Enfin, la persistance des effets conditionne l'importance respective à donner éventuellement aux séquences arables et non arables.

C'est pour étudier l'ensemble de ces aspects que des études ont été entreprises au Laboratoire des Techniques culturales et Assolements fourragers de Lusignan, l'objectif final étant l'intégration, dans les rotations, des meilleures techniques culturales applicables aux variétés commercialisées. Il s'agit donc d'une contribution à l'étude de l'écosystème sol-plante-animal.

Bien entendu, toute tentative de généralisation des résultats obtenus devra tenir compte des conditions de réalisation des expériences, et notamment des caractéristiques du milieu physico-chimique. On verra d'ailleurs, par la suite, que l'explication biologique de nombreuses observations ne pourra être fournie que par référence au climat ayant prévalu lors du déroulement des phases expérimentales. La notion de bilan hydrique est, de ce point de vue, particulièrement utile. En effet, si au seul regard de la pluviométrie annuelle, les essais décrits se situent dans un ensemble d'années pluvieuses, le bilan de l'eau a varié, d'une année à l'autre, entre des extrêmes de — 206 mm à + 85 mm, car les deux tiers des précipitations annuelles se produisent, à Lusignan, en période de faible évapotranspiration. Ainsi, au cours de la « phase préparatoire », deux années furent déficitaires au point de vue hydrique.

Du point de vue sol, on se trouve sur les meilleures terres de la région, dites « argiles rouges à châtaigniers », particulièrement aptes à une agriculture intensifiée de zone arable, bien que la structure des sols en place paraisse assez médiocre, mais grâce sans doute à des possibilités importantes de minéralisation de l'azote et à l'existence de réserves notables en potasse.

C'est donc dans un contexte bien défini qu'ont été implantés et suivis deux grands types d'expériences :

— les unes portant sur les effets résiduels, proprement dits, c'est-à-dire comportant une première phase préparatoire puis une phase d'évaluation. Se rattachent à cette catégorie les études portant sur l'influence des modalités de retournement d'une prairie et sur la valeur « précédent » de la luzerne, et de cultures fourragères variables dans leur composition et leur exploitation, évaluées par le moyen des performances des séquences de cultures arables suivantes : maïs, blé, avoine et blé, maïs, avoine ;

— les autres ayant trait aux effets cumulatifs, et constituant des essais de rotations au sens strict. On vise ici à additionner, dans le temps, les effets éventuels grâce à une succession de rotations. C'est-à-dire qu'il s'agit d'expériences de longue durée et dont une seule fera l'objet, dès maintenant, d'une mise au point surtout d'ordre méthodologique quant à la comparaison qualitative et quantitative de l'information recueillie en grandes parcelles, sans répétition, et de celle obtenue dans un dispositif en petites parcelles, les autres étant présentées sous forme de bilan provisoire.

L'implantation d'essais sur les rotations engageant l'avenir d'une recherche pour de nombreuses années, il n'a pas semblé inutile de réfléchir aux problèmes de technique expérimentale soulevés par de telles études. Le premier handicap à surmonter est à la fois, celui du très grand nombre de parcelles élémentaires et celui des dimensions minimales à leur donner. Nous pensons avoir suffisamment démontré l'intérêt qui s'attache aux possibilités d'utilisation, dans ces expériences, d'un matériel agricole normal dans ses caractéristiques mécaniques et, d'autre part, celui qui découle des possibilités de subdivision des parcelles de départ, en cours d'expérience. Ces conditions étant posées, une mécanisation quasi totale des opérations est réalisable aussi bien pour les travaux de préparation que pour ceux de mise en place et de récolte.

II. — EFFETS RÉSIDUELS DE LA LUZERNE SUR LE BLÉ ET LE MAÏS

I. — Introduction

La luzerne étant une légumineuse qui occupe en France près de deux millions d'hectares en vue de la production de fourrage ou de la déshydration, l'objectif premier de cet essai, très simple dans son dispositif, fut l'obtention de quelques informations sur la valeur comme précédent de cette culture dans ses rapports avec la fourniture d'azote.

En effet, considérée sous l'angle agronomique, la luzerne a toujours été classée dans les précédents favorables en tête de rotation, cette qualité étant reliée à l'enri-

chissement en azote du sol au cours de la végétation, grâce aux bactéries (*Rhizobium meliloti*) vivant en symbiose avec elle.

L'importance éventuelle de ce stockage, disponible pour les cultures suivantes, est mal connue. Les chiffres fournis par les auteurs d'études, conduites dans des milieux très différents, varient dans des proportions importantes.

La question principale posée dans l'expérience de recherche dont il est question ici est celle-ci : autour de quelle valeur, exprimée en kilogrammes d'azote, se situe l'effet *précédent* de la luzerne.

La place de la luzerne dans la rotation peut, en effet, dépendre de la réponse. Si cet effet est significatif, dans le cas des fermes possédant du bétail, cette légumineuse, résistant bien à la sécheresse, et fournissant en outre un fourrage riche en protéines, jouera plus qu'un rôle d'économiseur notable sur le poste budgétaire : achat d'aliments concentrés. De même, dans le cas de certaines exploitations où la mécanisation poussée a conduit d'abord à considérer le bétail comme un mal nécessaire puis à l'abandonner définitivement, laissant prévoir un appauvrissement possible en humus, la solution *luzerne* peut aussi être envisagée comme tête d'assolement exploitée intensivement — pour la transformation en farine ou la production de graine.

Dans ces deux éventualités, on peut espérer que cette culture diminuera les frais d'exploitation relatifs à la fumure azotée, aussi bien pendant sa période de production en tant que prairie que pendant les séquences arables ultérieures.

Dans le présent essai, deux plantes-tests aussi différentes que le blé et le maïs ont été utilisées. Enfin, on a délibérément éliminé l'étude de l'interaction « précédent × azote » afin de mieux déterminer l'effet simple *azote* propre à la luzerne (en équivalent - engrais), ceci, bien que, dans la pratique, un apport d'engrais azoté soit justifié derrière un tel précédent.

II. — Matériel et méthodes

1. *Description du dispositif et du protocole*

Il s'agissait d'un essai en blocs (6 répétitions) comportant 4 traitements. Les parcelles élémentaires initiales avaient une surface de 50 m² (10 m de long × 5 m de large). L'ensemble de l'essai, allées comprises, couvrait une surface de 1 560 m².

a) *Phase préparatoire.*

Deux traitements furent appliqués pendant cette phase, correspondant respectivement aux traitements 1 à 3 et 4 de la phase d'évaluation :

Traitements	Années		
	1962	1963	1964
1 2 3	maïs grain	maïs grain	maïs grain
4	luzerne	luzerne	luzerne

Aucun apport d'azote ne fut pratiqué pendant la phase préparatoire, les trois maïs successifs des traitements 1, 2 et 3 ayant pour but d'abaisser le niveau d'azote du sol à une valeur minimum. Le maïs utilisé appartenait au cultivar *I. N. R. A. 258* et était semé à raison de 75 000 plantes/ha en lignes écartées de 0,70 m. La luzerne, cultivar *Flamande*, fut semée en lignes distantes de 0,19 m à raison de 20 kg/ha, afin d'obtenir un peuplement à la levée de 750 plantes au m².

Les cultures furent donc implantées, et elles furent conduites par la suite, dans les conditions de la pratique agricole. C'est ainsi que la luzerne fut exploitée, chaque année, au stade *10 inflorescences au mètre linéaire* (soit 50 fleurs/m²).

Les rendements parcellaires ont été estimés sur des prélèvements de 6 m² pour la luzerne (à chaque coupe) et de 21 m² (3 lignes de 10 m à 0,70 m d'intervalles) pour le maïs, en matière verte. Quelle que soit la culture, ils sont exprimés en tonnes de matière sèche par hectare (t/ha) ; les exportations d'azote sont données en kilogrammes par hectare (kg/ha).

b) *Phase d'évaluation.*

Elle a comporté deux rotations par parcelle initiale :

Maïs — Blé — Avoine
Blé — Maïs — Avoine

Leur comparaison, phase par phase, n'a pu être réalisée, des doses d'azote différentes ayant été apportées aux cultures, à la suite d'une erreur d'épandage, sur les traitements 1 à 3. Par contre, le traitement 4 (précédent luzerne) est comparable d'une série à l'autre. Nous différencierons les deux rotations en les nommant essai A et essai B, respectivement (tabl. 4).

TABLEAU 4

Succession des cultures et doses d'azote apportées

Traitements	Année					
	1965		1966		1967	
	Culture	kg N/ha	Culture	kg N/ha	Culture	kg N/ha
			Essai A			
1	Maïs	50	Blé	50	Avoine	0
2	—	100	—	100	—	0
3	—	150	—	150	—	0
4	—	0	—	0	—	0
			Essai B			
1	Blé	200	Maïs	0	Avoine	0
2	—	250	—	0	—	0
3	—	300	—	0	—	0
4	—	0	—	0	—	0

L'ensemble des travaux culturaux et des mesures réalisées a été identique dans les deux cas.

Le maïs utilisé appartenait à la variété *I. N. R. A. 260* et le fut dans les mêmes conditions que durant la phase préparatoire. Le blé, *Cappelle*, fut semé de façon à obtenir 250 plantes/m² à la levée ; l'avoine de printemps, *Condor*, 300 plantes.

Les rendements sont exprimés en q/ha pour le grain (à 85 p. 100 de MS) et en t/ha (à 100 p. 100 de MS) pour l'ensemble de la masse végétale produite, à partir de prélèvements de 14 m² pour le maïs (et non comme dans la phase préparatoire), 18 pour le blé, 12 pour l'avoine. Les exportations d'azote sont données en kg/ha.

En outre, d'autres informations concernant le déroulement du cycle biologique des différentes plantes cultivées ont été recueillies :

— *aspect de la végétation* : notée de 0 (aspect le plus médiocre) à 5 (meilleur aspect), cette carac-

téristique, bien que paraissant subjective, englobe un grand nombre de traits de la végétation (densité, hauteur, couleur,...) et rend sensible, d'une façon assez nette, les réactions des plantes vis-à-vis, notamment, de facteurs nutritionnels limitants. Les notations étant effectuées par parcelles, à intervalles de deux semaines, ceci a permis une expression dynamique du comportement en fonction du temps et des stades du développement ;

— *mesure de hauteur :* complémentaire de la notation précédente, cette mensuration ne fut appliquée qu'au blé et seulement à partir de l'épiaison, le sommet de l'épi servant de point de repère ;
— *composantes du rendement* :

— *pour le blé,* à la levée, un emplacement correspondant à un mètre linéaire, fut tiré au hasard dans chaque parcelle. Il y fut pratiqué un comptage du nombre de plantes. L'ensemble des plantes correspondantes fut récolté à maturité et dépouillé, individu par individu, les éléments suivants étant évalués :

nombre total de talles,
nombre de talles épiées,
nombre de grains/épis,
poids de mille grains,
échaudage (note) ;

— *pour le maïs,* un comptage du nombre de plantes par parcelles fut réalisé un mois après la levée, puis une mensuration de 30 plantes par traitement. A la récolte, furent mesurés :

— le nombre d'épis total/parcelle,

— avant le battage, la longueur de 10 épis pris au hasard dans la récolte de chaque parcelle,

— le poids de mille grains ;

— *pour l'avoine,* mis à part le comptage à la levée, aucun dépouillement ne fut effectué à la récolte, celle-ci ayant eu lieu au stade grain pâteux.

2. *Conduite de l'expérimentation*

Précisons tout d'abord qu'il n'y eut aucun retour de la matière organique des parties récoltées pendant les 6 ans d'expérience ; autrement dit, il y a eu exportation totale de la partie aérienne des récoltes. L'ensemble des traitements fut mis en place au printemps 1962 et la phase préparatoire se termina en fin d'été 1964. Cette période ne présenta aucune caractéristique exceptionnelle, sinon un déficit hydrique estival 2 années sur 3 (1962 et 1964) pouvant avoir eu une action directe sur les possibilités de rendement du maïs et indirecte sur la minéralisation de l'azote organique du sol, ce qui a d'ailleurs conduit à ne pas utiliser uniquement un maïs comme plante-test, comme initialement prévu, mais à subdiviser chaque parcelle pour y cultiver la même année un blé d'hiver et un maïs grain.

Le déroulement des opérations selon le calendrier cultural est présenté dans le tableau synoptique de l'annexe 3. N'y figurent que les principaux travaux ayant pu avoir une action sur les données recueillies. Les autres interventions (entretien et nettoyage) furent conduites selon les normes préconisées en grande culture.

III. — RÉSULTATS

Nous distinguerons les données obtenues pendant la phase préparatoire de celles relatives à la phase d'évaluation.

1. — *Phase préparatoire*

a) *Les résultats culturaux globaux* sont résumés dans le tableau 5.

Aucun apport d'azote n'ayant été effectué durant cette phase, le bilan en cet élément derrière maïs est nettement négatif ; quant à celui derrière luzerne, c'est précisément le but de l'expérience d'en tenter l'estimation.

En 1962, la lente implantation de la luzerne, par suite de la sécheresse estivale, ne permit qu'une coupe de nettoyage non pesée, en juillet, suivie d'une autre, pesée

le 14-9. Le rendement en grain du maïs fut faible : 31,9 q/ha de M.S (correspondant à 37,5 q/ha) de grains à 15 % d'humidité.

TABLEAU 5

Production de matière sèche et exportations d'azote pendant la phase préparatoire

Traitements	Espèce	Production de M. S. (t/ha)				Exportations d'azote (kg/ha)			
		1962	1963	1964	Total	1962	1963	1964	Total
1-2-3	Maïs	6,707	8,348	5,670	20,725	59,33	70,76	53,88	183,97
4	Luzerne	0,384	12,190	9,870	22,444	11,52	297,69	219,08	528,29

L'année 1963, très nettement au-dessus de la moyenne pluviométrique, permit 4 coupes de luzerne et un rendement en grain du maïs de 31,2 q/ha de MS (36,7 à 15 p. 100 d'humidité).

L'été très sec de 1964 et la nécessité de retourner assez tôt la luzerne, afin d'assurer une bonne implantation du blé, n'autorisèrent que trois coupes de fourrage. Le troisième maïs sans azote, souffrant d'un déficit hydrique important, ne justifiait pas une récolte séparée du grain et de la paille. Sa masse végétale fut donc évaluée globalement.

L'analyse statistique des résultats obtenus sur maïs, chaque année et sur l'ensemble des années, confirma l'absence de différences significatives entre les parcelles destinées aux futurs traitements 1 à 3.

b) Pour apprécier *l'évolution du sol* sous les deux groupes de traitements, les mesures ont porté, à l'issue des trois années de phase préparatoire, sur la stabilité structurale et sur les taux de carbone et d'azote organiques.

En ce qui concerne la stabilité structurale, le tableau 6 rassemble les résultats obtenus, à savoir les principales composantes de l'indice S et ce dernier.

TABLEAU 6

Stabilité structurale sous les différents traitements à l'issue de la phase préparatoire

Traitements	A_{ga} vrais	A_{gb} vrais	A_{ge} vrais	(A + L) max	S
Maïs (3 ans)	14,79	1,15	1,16	30,5	3,92
Maïs —	13,02	0,64	0,65	32,3	4,69
Maïs —	13,91	1,48	3,28	30,9	4,20
Luzerne —	14,35	1,41	5,15	29,0	3,75
	NS	NS	NS	Non calculé	NS

Bien que le coefficient de variation soit inférieur à ce que l'on rencontre d'ordinaire dans ce type d'essai, aucun des éléments de l'indice n'a été modifié de façon

significative au cours de la phase préparatoire. Ce fait ne doit pas surprendre. A de nombreuses reprises, il a été montré que le repos du sol sous luzerne n'avait pas d'influence sensible sur la stabilité structurale de la couche arable considérée dans son ensemble. Les raisons invoquées (MONNIER, 1965) tiennent d'une part à une distribution des racines de luzerne moins régulière que celle des graminées fourragères, d'autre part à la longévité de ces racines qui ne se décomposent qu'après le retournement de la culture fourragère.

Quoi qu'il en soit, on peut considérer que la phase préparatoire n'a entrainé aucune différenciation de comportement entre les différents précédents, ce qui devrait simplifier l'interprétation des comparaisons de rendements au cours de la phase d'évaluation.

Pour ce qui est des constituants caractéristiques de la matière organique, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 7.

TABLEAU 7

Carbone et azote organique sous les différents traitements à l'issue de la phase préparatoire

Traitement	C Total p. 1 000	N p. 1 000	C/N
3 maïs sans fumure azotée 1	16,54	1,53	10,8
3 maïs sans fumure azotée 2	16,03	1,43	11,1
3 maïs sans fumure azotée 3	16,15	1,48	10,9
3 ans luzerne 4	18,29	1,62	11,2
P.p.d.s.	1,42	0,14	non calculé

On constate que les taux de carbone total ont été accrus sous luzerne de façon significative. Les quantités supplémentaires calculées en comparant le traitement (4) à la moyenne des traitements (1) (2) et (3) font apparaître un enrichissement de la couche arable correspondant approximativement à 12 t de matière organique sèche à l'ha et à environ 400 kg d'azote.

Un fractionnement densimétrique des matières organiques montre que cet enrichissement se répartit approximativement pour moitié sur la matière organique liée et pour moitié sur la matière organique libre.

Les 6 tonnes de matières organiques liées supplémentaires peuvent être attribuées à une minéralisation plus lente du stock d'humus présent dans la couche arable au cours des années sans travail du sol. Quant aux 6 tonnes de matières organiques libres, elle représentent approximativement l'apport que constituent les racines de luzerne présentes dans la couche labourée.

Dans l'ensemble, le rapport C/N calculé de l'apport est de l'ordre de 15, c'est-à-dire qu'il est sensiblement plus faible que sous prairie de graminées pures où il est couramment de l'ordre de 20 à 30.

2. — *Phase d'évaluation*

a) *Essai A* (rotation maïs — blé — avoine) :

1965 : première année de mesure à l'aide du maïs.

Dès la première année, les différences de rendements et d'exportations d'azote (tabl. 8) sont suffisamment nettes et significatives pour estimer les effets résiduels du traitement 4 équivalents à l'apport de 100 unités d'azote (les différences n'étant jamais statistiquement significatives entre les traitement 4 et 2). On peut donc admettre que, dans les conditions de l'expérience, une minéralisation correspondant à une centaine de kilogrammes d'azote s'est produite derrière luzerne, dès la première année de culture, au profit du maïs. En outre, il est intéressant de noter que l'azote de l'engrais n'a pas agi de la même manière dans les intervalles 50-100 kg/ha et 100-150 kg/ha :

kg de matière sèche obtenus par kg d'azote supplémentaire

Nature de la masse végétale		grain	paille + rafles	total (g+p+r)
Intervalle	50-100	17,26	13,08	30,34
	100-150	12,46	16,22	28,68

L'effet global de l'azote (à la limite des rendements moins que proportionnels pour la dose 150) est identique pour les deux intervalles mais la répartition de cet

TABLEAU 8

Essai A (rotation maïs-blé-avoine) = 1966, première année de mesure (maïs)
Rendements

Précédents	Apport d'azote (kg/ha)	Nombre d'épis/ plante	Rendements					Rapport	
			Grains à 15 % eau (q/ha)	t/ha de MS				Grain	Rafles
				Grain	Paille	Rafles	Total	Paille	Grain
Maïs 1	50	0,943	56,98	4,845	3,100	0,834	8,779	1,562	0,269
Maïs 2	100	0,973	67,12	5,708	3,570	1,018	10,296	1,598	0,285
Maïs 3	150	0,977	74,45	6,331	4,360	1,039	11,730	1,452	0,238
Luzerne 4	0	0,958	63,28	5,381	3,410	0,995	9,786	1,578	0,291
P.p.d.s.		NS	5,18	0,441	0,290	NS	0,462		

Exportations d'azote par la matière sèche

Précédents	Apport d'azote (kg/ha)	Exportations (kg/ha)				Teneur (%)		
		Grain	Paille	Rafles	Total	Grain	Paille	Rafles
Maïs 1	50	62,53	23,60	4,72	90,85	1,29	0,76	0,56
Maïs 2	100	79,94	31,85	5,77	117,56	1,40	0,89	0,56
Maïs 3	150	93,74	45,77	5,89	145,40	1,48	1,05	0,57
Luzerne 4	0	74,83	27,30	5,64	107,77	1,39	0,80	0,56
P.p.d.s.		6,24			6,15	0,06		

effet entre les organes végétaux est différente. Ce phénomène, que nous rencontrerons plusieurs fois dans le cours de cette série d'articles, démontre la nécessité d'estimer les effets résiduels non seulement sur le rendement en grain, mais aussi sur le rendement global, et mieux sur les parties de ce rendement, si l'on veut réaliser correctement les interprétations agronomiques et essayer d'expliquer les mécanismes d'action d'un précédent.

Les notations d'aspect de la végétation (fig. 1) bien que moins précises sur une plante allogame comme le maïs que sur une autogame comme le blé, ne révèlent une progression continue des notes, jusqu'à un palier, que pour le traitement 3. Les autres traitements voient leurs notes diminuer, et notamment le traitement 4, entre le 21-7 et le 17-8. L'explication pourrait en être une demande d'azote intense au moment de la floraison (survenue précisément pendant cet intervalle) ; précédemment, les notes de ce traitement étaient, par contre, meilleures que celles des traitements 1 et 2 (ce dernier, non statistiquement différent sur la base du rendement à la récolte). Les traitements 1 à 3 sont différents les uns des autres pendant toute la durée de la végétation ce qui indique un effet dose d'azote marqué, depuis le départ, même en période végétative à faibles besoins.

Deux mensurations effectuées les 21-7 et 18-8 n'ont pas apporté de résultats plus précis que les notations. A titre indicatif, ces mesures sont données au tableau 9.

TABLEAU 9

Hauteur moyenne de 30 plantes/traitement (cm)

Précédents		21-7	18-8
Maïs	1 + 50 N	81,2	102,7
	2 + 100 N	88,5	107,4
	3 + 150 N	84,8	108,7
Luzerne	4 + 0 N	89,7	106,2
		NS	non calculé

La hauteur finale, identique pour tous les traitements, a été estimée par sondages à 1,50-1,60 m. Les différences de rendement en paille ne peuvent donc être attribuées qu'à une variation de la grosseur ou de la densité physique des tiges.

La mesure, après récolte, de 60 épis pris au hasard a surtout révélé l'importance de la variabilité intra-variétale. La longueur moyenne d'un épi (en cm) correspondait, pour les traitements 1 à 4, à 16,5, 17,3, 17,9 et 16,5 respectivement.

1966 : deuxième année de mesure à l'aide du blé.

Comme les rendements du maïs en 1965, ceux du blé réagissent en fonction de la dose d'azote appliquée aux traitements 1 à 3 (tabl. 10). Seule la dose « 150 kg/ha » permet une production de grain correcte. Pour les deux autres, la médiocrité des performances est probablement due à une mauvaise nutrition azotée, comme l'indiquent, d'ailleurs, les notes d'aspects (fig. 1). On constate, à nouveau, que cet aspect reflète bien la fertilisation azotée apportée même à un moment où les besoins des plantes sont vraisemblablement encore peu importants (notations du 21-3). Ensuite,

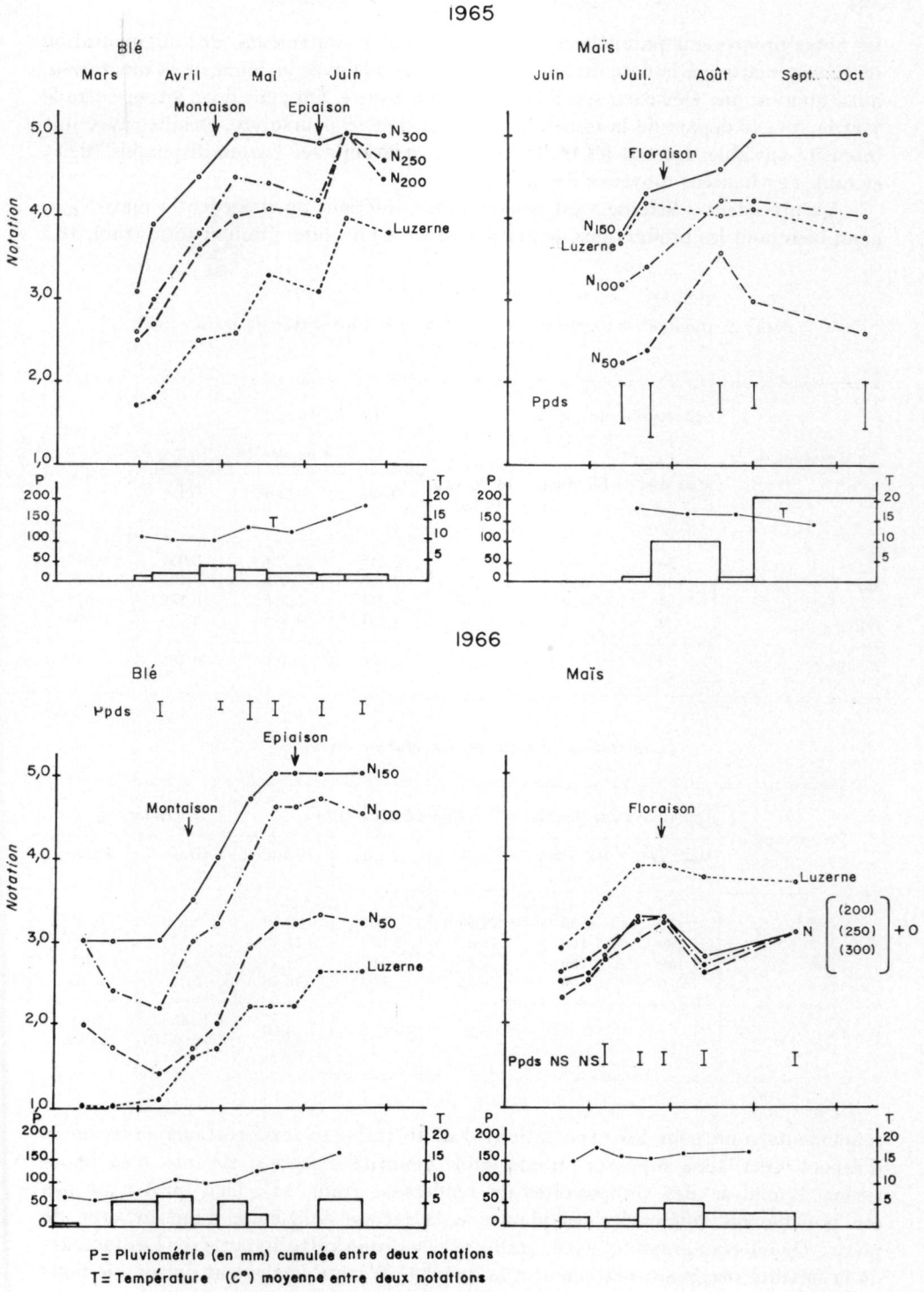


FIG. 1. — *Relation aspect de la végétation-temps* (Traitements 1, 2, 3, 4)

les notes progressent parallèlement. Pour les quatre traitements, une augmentation nette se remarque à la date du 20-4, laquelle coïncide avec le début de la montaison, ainsi qu'avec une élévation sensible de la température. On peut donc situer entre le 7 et le 20-4 le départ de la minéralisation qui doit se poursuivre, ensuite, avec une intensité variable, suivant les traitements, en relation avec l'azote disponible (fig. 1 et tabl. 11 : hauteur moyenne des plantes).

Le précédent « luzerne » est constamment inférieur au précédent « maïs-N_{50} », aussi bien pour les productions de matière sèche à l'hectare, grain et total (tabl. 10 :

TABLEAU 10

*Essai A (rotation maïs-blé-avoine) = **1966**, deuxième année de mesure (blé)*
Rendements

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)		Rendements				Rapport Grain / Paille
	Maïs 1965	Blé 1966	Grain à 15 % eau (q/ha)	t/ha de MS			
				Grain	Paille	Total	
Maïs 1	50	50	27,26	2,318	2,736	5,054	0,847
Maïs 2	100	100	44,51	3,785	4,470	8,255	0,846
Maïs 3	150	150	55,47	4,717	5,555	10,272	0,849
Luzerne 4	0	0	21,06	1,791	1,884	3,675	0,950
P.p.d.s.			3,71	0,316	0,400	0,705	

Exportations d'azote par la matière sèche

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)		Exportations (kg/ha)			Teneur (%)	
	Maïs 1965	Blé 1966	Grain	Paille	Total	Grain	Paille
Maïs 1	50	50	34,54	7,93	42,47	1,49	0,29
Maïs 2	100	100	59,42	12,07	71,49	1,57	0,27
Maïs 3	150	150	77,83	16,67	94,50	1,65	0,30
Luzerne 4	0	0	30,45	6,03	36,48	1,70	0,32
P.p.d.s.			5,37	1,24	6,50	Toutes différentes	Non calculé

rendements) que pour les exportations d'azote (tabl. 10 : exportations) et les notes d'aspect. Ceci laisse supposer qu'une faible quantité d'azote a été mise à sa disposition. L'analyse des composantes du rendement (tabl. 11), bien qu'il n'ait pas été possible de différencier les plantes à la récolte à la suite d'une attaque de piétin, *Ophiobolus graminis* SACC. (tabl. 12) confirme cette hypothèse. Les facteurs de la fertilité réagissent nettement à la quantité d'azote facilement disponible pour la plante et concourrent à démontrer l'impossibilité, pour une culture d'hiver, succé-

dant à une culture d'été, de trouver suffisamment d'azote dans le sol en deuxième culture « derrière luzerne », même à des périodes où le rendement n'est encore qu'en « préparation ». On notera, en outre, que la nocivité des attaques de piétin est nettement dépendante de la nutrition azotée (GARRETT, 1950).

TABLEAU II

Essai A (rotation maïs-blé-avoine) = 1966, deuxième année de mesure (blé)
Composantes du rendement

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)		Par mètre linéaire			Nombre de grains par épis	Poids de 1000 grains (à 15 % eau (g)	Échaudage 0=maxim 5 = nul	Rapport talles-épis — talles-tot.
	Maïs 1965	Blé 1966	Nombre de plantes levées	Nombre de talles	Nombre d'épis				
Maïs 1	50	50	68	94,46	52,8	23,80	52,430	3,68	0,56
Maïs 2	100	100	68	109,95	65,5	27,10	53,213	3,35	0,59
Maïs 3	150	150	67	118,45	71,3	30,83	53,690	2,37	0,60
Luzerne 4	0	0	63	77,96	48,6	19,16	50,306	3,23	0,62
P.p.d.s.			NS	14,30	10,9	3,10	2,060	0,90	

Hauteur moyenne des plantes (cm)

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)		27-5	6-6 (1)	Croissance absolue dans l'interv. (2)	Croissance relative d. l'int. (3)
	Maïs 1965	Blé 1966				
Maïs 1	50	50	62,5	98,3	+ 35,8	0,57
Maïs 2	100	100	75,8	105,8	+ 30	0,40
Maïs 3	0	0	84,0	112,5	+ 28,5	0,34
Luzerne 4	0	0	46,2	83,7	+ 37,5	0,92
P.p.d.s.			Toutes différentes	6,0		

(1) Hauteur définitive.
(2) Hauteur au 6-6 — Hauteur au 27-5.
(3) $\frac{\text{Hauteur au 6-6 — Hauteur au 27-5}}{\text{Hauteur au 27.5.}}$

Comme pour le maïs, l'engrais apporté n'a pas agi de la même façon tout au long de l'intervalle 50-150 unités :

kg de matière sèche obtenus par kg d'azote supplémentaire

Nature de la masse végétale :		grain	paille	totale
Intervalle	50-100	29,34	34,68	64,02
	100-150	18,54	21,70	40,24

TABLEAU 12

Notations de piétin (1) (Ophiobolus graminis SACC.)
(p. 100 moyen de plantes malades avant la récolte)

Traitements	Échaudage	Verse
1	25,3	49,1
2	15,7	62,1
3	23,7	59,8
4	43,3	67,1

(1) Effectuées par M. LEMAIRE (Station de Pathologie, E.N.S.A., Rennes).

La différence de réaction est plus accentuée que pour le maïs. Chez le blé, en constant déséquilibre vis-à-vis de la fourniture d'azote par le sol, un apport échelonné de 50 unités, dans l'intervalle 50-100, fait augmenter le rendement dans des proportions importantes, alors qu'avec le maïs ayant précédé, les effets sont beaucoup plus tamponnés, la croissance coïncidant avec la période de minéralisation.

Sans restitution des pailles depuis 1961, et, par conséquent, en régime d'épuisement de la matière organique, les traitements 1 à 3 conduisent à des réactions parallèles des deux cultures, exprimées en bilan : apports d'engrais — exportations d'azote (fig. 2) :

Traitements	Apports d'azote (kg/ha)		Export. d'azote (kg/ha)		Bilan dans le sol (kg/ha)	
	Maïs 1965	Blé 1966	Maïs 1965	Blé 1966	Maïs 1965	Blé 1966
1	50	50	90	42	— 40	+ 8
2	100	100	117	71	— 17	+ 29
3	150	150	145	94	+ 5	+ 56

Dans la mesure où la majorité de l'azote de l'engrais se retrouve dans les cultures, plus la dose augmente, plus le sol tend à apparaître comme un support inerte pour la plante, vis-à-vis de cet élément. Pour la succession maïs-blé, le bilan aurait été balancé pour un apport annuel de 85 kg d'azote par hectare.

1967 : troisième année de mesures à l'aide de l'avoine.

Les résultats de la troisième année de culture-test contribuent à clarifier les conclusions à tirer de cet essai, en venant confirmer que l'engrais chimique seul, sans le concours de la matière organique, ne peut maintenir, dans les conditions de l'expérience, la fertilité du sol à un niveau élevé. En effet, dans le tableau 13, on voit que les traitements 1 à 3 correspondent aux mêmes rendements et que seul le traitement 4, avec 1,45 t de plus (en MS) que la moyenne des trois autres, révèle un

effet résiduel très nettement positif, à long terme, de la luzerne. Cet effet peut s'expliquer en partie, par le déphasage entre la fourniture d'azote par le sol en 1966 et les besoins de la plante cultivée cette année-là, autrement dit le blé d'hiver, qui n'a pu utiliser qu'une faible quantité du stock présent, le reste devant être jusqu'au printemps sous une forme inaccessible à la culture, d'où son mauvais rendement. L'avoine

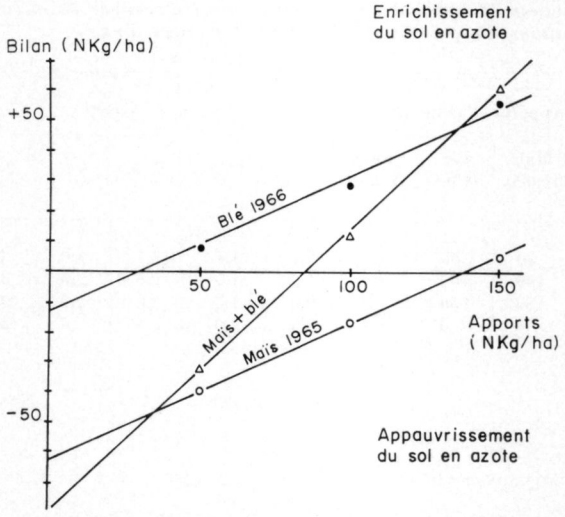


FIG. 2. — *Variation du bilan de l'azote avec la dose d'engrais azoté apportée*

TABLEAU 13

Essai A (rotation maïs-blé-avoine) = 1967, troisième année de mesure (avoine)
Rendements et exportations d'azote par la matière sèche

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)			Rendement total (t/ha de MS) (1)	Exportations d'azote (kg/ha)	Teneur azote (%)
	Maïs (1965)	Blé (1966)	Avoine (1967)			
Maïs 1	50	50	0	5,483	37,65	0,688
Maïs 2	100	100	0	5,412	36,48	0,673
Maïs 3	150	150	0	5,702	36,62	0,645
Luzerne 4	0	0	0	6,988	44,54	0,636
P.p.d.s				0,633	6,85	NS

(1) Récolte au stade grain pâteux.

a donc bénéficié, de par sa position dans la rotation, d'azote non absorbé précédemment, mais aussi, bien entendu, d'une minéralisation cadrant mieux avec ses besoins propres. On peut dire, en tous cas, qu'elle a toujours présenté un aspect plus luxuriant derrière luzerne (tabl. 14). On verra plus loin (tabl. 23) que le rendement de

l'avoine, après la succession « Blé + Maïs », est significativement inférieur à celui trouvé ici. Dans ce dernier cas, la plante venant derrière maïs n'a pas bénéficié de reliquats mais s'est trouvée, au contraire, sur un sol appauvri, sans réserves.

TABLEAU 14

Essai A (rotation maïs-blé-avoine) = 1967, troisième année de mesure (avoine)
Notations d'aspect de la végétation et hauteur finale

Précédents	Apports d'azote (kg/ha) Maïs (1965)	Blé (1966	Avoine (1967)	Aspect 2-5	11-5	23-5	6-6	23-6	17-7	Hauteur (cm) 11-7
Maïs 1	50	50	0	2,1	1,7	2,7	3,0	3,0	3,6	85,8
Maïs 2	100	100	0	1,6	1,7	2,7	2,8	3,0	3,6	85,8
Maïs 3	150	150	0	2,0	1,7	2,6	2,9	3,2	3,9	84,9
Luzerne 4	0	0	0	2,5	3,0	3,9	3,8	3,8	4,4	98,3
P.p.d.s				Non calculée		0,4		Non calculée		
Facteurs climatiques entre 2 notations — Température moyenne (C°)					12,3	13,6	14,8	16,3		
Pluviométrie cumulée en mm					54,8	84,4	10,5	22,2		

Bilan des trois années de la phase de mesure.

La production totale de matière sèche et les exportations cumulées d'azote correspondantes sont rassemblées au tableau 15. Sur la base de la seule matière sèche, on peut rapprocher les rendements du traitement 4 de celui du traitement 1, dont il

TABLEAU 15

Essai A = Bilan des trois années de la phase de mesure
Rendements en matière sèche et exportations d'azote pour la période 1965-1967

Traitements (précédents + azote)	Rendement en MS (t/ha) 1965 maïs	1966 blé	1967 avoine	Total	Exportations d'azote (kg/ha) 1965 maïs	1966 blé	1967 avoine	Total	Bilan de l'azote (kg/ha) Ap.-export
1. 50 + 50 + 0 ...	8,779	5,054	5,483	19,316	90,85	42,47	37,65	170,97	— 71
2. 100 + 100 + 0 ...	10,296	8,255	5,412	23,963	117,56	71,49	36,48	225,53	— 26
3. 150 + 150 + 0 ...	11,730	10,272	5,702	27,704	145,40	94,50	36,62	276,52	+ 24
4. 0 + 0 + 0 ...	9,786	3,675	6,988	20,449	107,77	36,48	44,54	188,79	
P.p.d.s.	0,462	0,705	0,633	1,541	6,15	6,50	6,85		

n'est pas significativement différent. Une luzerne de trois ans laisse donc une terre capable de fournir une quantité d'N équivalente à ce qu'a fourni un sol recevant 100 unités d'azote en trois ans. Sur la base des exportations d'azote les fournitures par le sol s'établissent à 189 kg et 171 kg, respectivement derrière luzerne et derrière trois maïs sans azote. L'utilisation comparée des exportations pour l'explication des résultats obtenus est cependant délicate, à cause des bilans d'azote très différents. Dans le cas des traitements recevant une fertilisation azotée, la fourniture du sol ou son enrichissement sont plus ou moins proportionnels à la dose apportée. Quant aux cultures derrière luzerne, la fourniture d'azote par le sol, indépendante de l'effet « légumineuse », est difficile à évaluer. D'autre part, la minéralisation des résidus organiques du précédent est fortement influencée par l'action conjuguée des facteurs climatiques et des façons culturales.

b) *Essai B* (rotation blé-maïs-avoine).

1965: première année de mesure à l'aide du blé.

Les doses élevées d'apports d'azote sur les traitements 1, 2 et 3 ont nivelé les rendements en grain à 50 q/ha et seul le traitement 3 extériorise un gain de 1 t/ha

TABLEAU 16

Essai B (rotation blé-maïs-avoine) = 1965, première année de mesure (blé)
Rendements

Précédents	Apport azote (kg/ha) blé (1965)	Rendements				Rapport grain / paille
		grain à 15 % eau (q/ha)	t/ha de MS			
			Grain	Paille	Total	
Maïs 1	200	50,26	4,274	4,388	8,662	0,974
Maïs 2	250	50,13	4,263	4,317	8,580	0,987
Maïs 3	300	50,00	4,251	5,264	9,515	0,804
Luzerne 4	0	42,66	3,628	2,652	6,280	1,368
P.p.d.s.		3,38	0,288	0,558	0,735	

Exportations d'azote par la matière sèche

Précédents	Apport azote (kg/ha) blé (1965)	Exportations (kg/ha)			Teneur (%)	
		Grain	Paille	Total	Grain	Paille
Maïs 1	200	81,87	17,92	99,79	1,92	0,41
Maïs 2	250	83,29	16,34	99,63	1,96	0,38
Maïs 3	300	89,37	20,45	109,82	2,11	0,39
Luzerne 4	0	65,43	9,24	74,67	1,81	0,35
P.p.d.s.		5,44	2,24	6,80		

en paille. Les teneurs en azote du grain augmentent en fonction de la quantité d'engrais apportée (tabl. 16).

L'infériorité de comportement derrière luzerne est explicable par l'examen des composantes du rendement (tabl. 17). A nombres de plantes statistiquement iden-

TABLEAU 17

*Essai B (rotation blé-maïs-avoine) = **1965**, première année de mesure (blé)*
Composantes du rendement

Précédents	Apports (kg/ha) blé (1965)	Par mètre linéaire			Nombre de grains par épi	Poids de 1000 grains (à 15 % eau) (g)	Échaudage 0 = maxim. 5 = nul	Rapport talles-épis / talles tot.
		Nombre de plantes levées	Nombre de tallles	Nombre d'épis				
Maïs 1	200	45,1	234,97	70,80	29,75	54,900	4,00	0,301
Maïs 2	250	48,3	230,39	85,00	27,65	55,030	4,25	0,369
Maïs 3	300	45,0	226,80	84,15	26,10	51,743	2,25	0,371
Luzerne 4	0	42,3	141,70	51,60	29,39	58,883	5,00	0,366
P.p.d.s.		NS			NS	3.320		

N. B. Il n'y a pas eu de verse.

tiques (38 environ par mètre linéaire à la récolte), deux composantes ont joué un rôle prépondérant sur le rendement : le nombre d'épis et le poids de 1 000 grains. Il apparaît que l'infériorité du précédent « luzerne » (traitement 4) est explicable par le nombre d'épis insuffisant au m², sans que le poids de 1 000 grains (et éventuellement le nombre de grains par épi) ait pu compenser ce handicap de départ. La comparaison des composantes du rendement du blé, pour ce traitement, lors des deux années de mesure : en 1965, directement après le retournement de la luzerne ; en 1966, après maïs (tabl. 11), fait ressortir dans le deuxième cas, une « faim » d'azote encore plus sérieuse, matérialisée par le tableau 18 (compte tenu du fait qu'en 1966 un effet « année » a pu se superposer à l'effet « précédent »).

TABLEAU 18

Comparaison des composantes du rendement du blé après luzerne et après luzerne suivie de maïs

Année	Précédent	Rendement en grain (q/ha)	Nombre		Poids de 1 000 grains
			d'épis/m.l.	grains/épi	
1965	Luzerne	36,28	51,6	29,39	58,883
1966	Maïs	17,91	48,6	19,16	50,306

Les conditions sont accentuées par l'année de culture supplémentaire, après luzerne.

Si le nombre d'épis fut pratiquement le même dans les deux cas, les deux cultures se différencient par la suite. Aussitôt après retournement, les résidus de luzerne ont libéré assez d'azote pour entraîner la formation d'un plus grand nombre de grains, également mieux nourris ; alors qu'après un an de culture, la compensation de cer-

TABLEAU 19

Essai B (rotation blé-maïs-avoine) = 1965, première année de mesure (blé)
Hauteur moyenne des plantes (cm)

Précédents	Apport d'azote (kg/ha) blé (1965)	5-6	15-6 (1)	Croissance absolue (2)	Croissance relative (3)
Maïs 1	200	92,3	107,3	+ 15,0	0,14
Maïs 2	250	93,3	107,5	+ 14,2	0,14
Maïs 3	300	97,5	108,8	+ 11,3	0,10
Luzerne 4	0	81,7	100,6	+ 18,9	0,23
P.p.d.s.		4,7	3,6		

(1) Hauteur définitive.
(2) Hauteur au 15-6 — Hauteur au 5-6
(3) $\frac{\text{Hauteur au 15-6 — Hauteur au 5-6}}{\text{Hauteur au 5-6.}}$

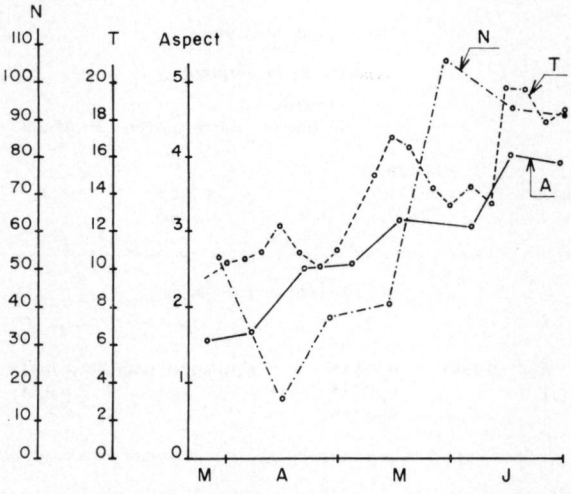


FIG. 3. — *Relation entre l'évolution de l'aspect d'un blé derrière luzerne, l'élévation de la température du sol et la minéralisation de l'azote.*
T = température moyenne (5 jours) à 5 cm dans le sol.
N = N kg/ha sur 60 cm, sous sol nu, n'ayant pas reçu d'azote.

taines composantes (nombre de grains/épi et surtout poids de 1 000 grains) qui s'était manifestée en 1965, n'a pu jouer en 1966. C'est probablement là une conséquence de la faim d'azote, certainement rendue plus aiguë par l'attaque, plus grave sur ce traitement, de piétin-échaudage (tabl. 10), effet plutôt que cause de la mauvaise nutrition des plantes.

En comparant les notations d'aspect pour les quatre traitements (fig. 1 et tabl. 19), on s'aperçoit que les plantes derrière luzerne dépendent plus des facteurs

TABLEAU 20

Relation entre l'évolution de l'aspect d'un blé derrière luzerne (A), l'élévation de la température du sol (T) et la minéralisation de l'azote (N)

$A = 0{,}202\ T + 0{,}43$

Analyse de la variance

		Degrés de liberté	Carré moyen	F calculé	F 0,05
Total	3,59	6			
Régression	2,23	1	2,23	8,26	6,61
Résidu	1,36	5	0,27		

$A = 0{,}016\ N + 1{,}83$

Analyse de la variance

		Degrés de liberté	Carré moyen	F calculé	F 0,05
Total	3,59	6			
Régression	2,87	1	2,87	20,50	6,61
Résidu	0,72	5	0,14		

$N = 12{,}65\ T - 87{,}41$

Analyse de la variance

		Degrés de liberté	Carré moyen	F calculé	F 0,05
Total	11 430,0	6			
Régression	8 752,5	1	8 752,5	16,34	6,61
Résidu	2 677,5	5	535,5		

Coefficients de corrélation

	T	N
A	0,789*	0,894**
T		0,875**

$r_{A \cdot TN} = 0{,}887^{**}$

* significatif pour P = 0,05
** — — = 0,01

climatiques que celles des trois autres traitements dont les notes progressent très régulièrement. Tout se passe comme si la fertilisation azotée mettait à l'abri le végétal des aléas d'une minéralisation très influencée par les conditions écologiques. Il y a

une relation nette entre la réalisation de l'aspect final pour le blé derrière luzerne et, d'une part, l'élévation de la température du sol, d'autre part, la minéralisation de l'azote (fig. 3 et tabl. 20), même si le rythme de ce dernier phénomène n'est pas absolument identique en sol nu et sous culture.

1966 : deuxième année de mesure à l'aide du maïs.

A la suite des doses importantes d'azote appliquées à la culture du blé en 1965, il a paru logique de tenter d'estimer les effets résiduels de cette fertilisation anormale au travers de la culture du maïs. L'intérêt des résultats obtenus (tabl. 21) réside dans le fait que ces effets résiduels de fortes doses d'azote ne sont pas suffisants pour maintenir une fertilité élevée puisque les rendements des trois premiers traitements sont inférieurs à celui du traitement 4. Néanmoins, une certaine action est possible,

TABLEAU 21

Essai B (rotation blé-maïs-avoine = 1966, deuxième année de mesure (maïs)
Rendements

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)		Nombre d'épis/ plante	Rendements					Rapport	
				Grain à 15 % eau (q/ha)	t/ha de MS				Grain	Rafles
	Blé (1965)	Maïs (1966)			Grain	Paille	Rafles	Total	paille	grain
Maïs 1	200	0	0,943	42,31	3,598	3,328	0,981	7,907	1,081	0,272
Maïs 2	250	0	0,949	43,04	3,660	3,417	0,993	8,070	1,071	0,271
Maïs 3	300	0	0,944	43,72	3,718	3,315	1,067	8,100	1,121	0,286
Luzerne 4	0	0	0,941	53,68	4,565	3,828	1,218	9,611	1,192	0,266
P.p.d.s.			NS	4,78	0,407	NS	NC	0,906		

Exportations d'azote par la matière sèche

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)		Exportations (kg/ha)				Teneur (%)		
	Blé (1965)	Maïs (1966)	Grain	Paille	Rafles	Total	Grain	Paille	Rafles
Maïs 1	200	0	42,78	15,29	3,23	61,30	1,19	0,47	0,35
Maïs 2	250	0	43,15	15,70	3,28	62,13	1,18	0,46	0,31
Maïs 3	300	0	44,58	15,23	3,52	63,33	1,20	0,46	0,31
Luzerne 4	0	0	55,64	17,59	4,02	77,25	1,22	0,46	0,34
P.p.d.s.			4,85	NC	NC	6,61			

dont le classement des traitements 1, 2 et 3, identique à celui des doses d'azote appliquées l'année précédente, pourrait être une image, bien que les différences ne soient pas statistiquement significatives.

Entre les trois traitements « azote », les notes d'aspects n'ont guère varié (fig. 1), les écarts n'étant que des fluctuations indépendantes du facteur « contrôlé ». Par contre, le traitement 4 se trouve toujours en tête, ce qui révèle des possibilités d'absorption supérieures. En deuxième année après luzerne, le maïs fournit encore un rendement satisfaisant comparable, au point de vue exportations de matière sèche, à ce qu'il était l'année précédente, immédiatement derrière luzerne : 9,61 t/ha en 1966 contre 9,79 en 1965. Cependant, cette matière sèche se répartit différemment dans les organes aériens : 55 p. 100 dans le grain en 1965 (le reste dans la paille et les rafles) contre 47,5 p. 100 en 1966, ce qui pourrait être le signe d'une meilleure fourniture d'azote en première année derrière luzerne (ce qui est confirmé par les chiffres d'exportation). Ceci peut aussi être à l'origine de la baisse des notes d'aspect après la floraison (fig. 1), c'est-à-dire à un moment d'exigences élevées en fourniture d'azote. Il faut cependant rappeler, également, que la pluviométrie de l'été 1966, mieux répartie, a également contribué à favoriser la production de paille.

Sur les cultures d'été, l'effet « année » intègre donc bien la dynamique particulière de l'azote du sol, pendant la période de végétation.

Les poids de 1 000 grains (tabl. 22*a*) et la longueur moyenne sont donnés à titre indicatif.

TABLEAU 22 *a*

Essai B (rotation blé-maïs-avoine) = 1966, deuxième année de mesure (maïs)
Hauteur moyenne et poids de 1 000 grains

Traitements	Longueur moyenne de 60 épis (cm)	Poids de 1 000 grains à 85 % de MS (g)
1	12,83	293,41
2	13,11	292 23
3	13,66	291,64
4	14,83	301,05
Ppds	1,21	NC

1967 : troisième année de mesure à l'aide de l'avoine.

Les résultats concordent avec ceux présentés pour l'essai A (tabl. 22*b*) tant pour les rendements qu'au point de vue évolution de l'aspect. On remarque encore, sur cette troisième culture, un très léger effet résiduel de la dose d'azote 300. Les exportations derrière luzerne restent les plus élevées, mais elles sont d'un niveau moindre que dans l'essai A.

TABLEAU 22 *b*

Essai B (rotation blé-maïs-avoine) = 1967, troisième année de mesure (avoine)
Rendements et exportations d'azote par la matière sèche

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)			Rendement total (t/ha de MS) (1)	Exportations d'azote (kg/ha)	Teneur en azote (%)
	Blé (1965)	Maïs (1966)	Avoine (1967)			
Maïs 1	200	0	0	4,880	31,44	0,645
Maïs 2	250	0	0	4,880	32,36	0,663
Maïs 3	300	0	0	4,905	31,85	0,651
Luzerne 4	0	0	0	5,775	38,54	0,665
P.p.d.s.				0,583	5,00	

(1) Récolte au stade grain pâteux.

Notation d'aspect de la végétation et hauteur finale

Précédents	Apports d'azote (kg/ha)			2-5	11-5	23-5	6-6	23-6	17-7	Hauteur (cm) 11/7
	Blé (1965)	Maïs (1966)	Avoine (1967)							
Maïs 1	200	0	0	1,50	1,16	2,20	2,41	2,41	2,90	76,6
Maïs 2	250	0	0	1,16	1,16	2,20	2,41	2,50	2,90	79,1
Maïs 3	300	0	0	1,33	1,16	2,20	2,50	2,50	3,07	78,3
Luzerne 4	0	0	0	1,83	1,66	2,80	3,00	3,25	3,73	84,9
P.p.d.s.				NC	NC	0,44	NC	NC	NC	NC
Facteurs climatiques entre deux notations — Température moyenne (C).				12,3	13,6	14,8	16,3			
Facteurs climatiques entre deux notations — Pluviométrie cumulée en mm				54,8	84,4	10,5	22,2			

Bilan des trois années de la phase de mesure.

Les exportations totales (tabl. 23), quel que soit le traitement, ne sont pas significativement différentes, contrairement à ce qui s'est passé dans l'autre rotation (tabl. 15), ce qui soulève, entre autres, le problème de l'efficacité d'apports élevés d'azote (perte ou blocage). Graphiquement, la relation entre le bilan de l'azote et l'apport en cet élément sur les deux rotations de 3 ans est représentée sur la figure 4. Cette fois encore, il semble y avoir une relation linéaire entre le bilan dans le sol et les apports. L'une des conclusions à donner à cet état de fait pourrait être qu'en présence d'un sol appauvri en matière organique, de fortes doses d'azote apportées en une seule fois ne maintiennent pas une fertilité élevée. En effet, dans l'essai A avec des doses identiques et mieux réparties, on obtient de meilleurs résultats (tabl. 24).

Il paraît bon de rappeler que les traitements 1 à 3 ont été conduits de la même manière en phase préparatoire ; on pouvait donc considérer qu'au départ de la phase de mesure, les sols étaient identiques, notamment au point de vue taux de matière organique et c'est bien ce qui ressort de l'analyse (tabl. 7). On peut penser qu'un effet résiduel ne se fait sentir qu'à la suite d'une différenciation dans le taux d'accumulation de la matière organique à la suite de la réalisation de rendements agronomiques différents, laissant obligatoirement, dans le sol, des quantités de résidus proportionnelles.

TABLEAU 23

Essai B : Bilan des trois années de la phase de mesure
Rendements en matière sèche et exportations d'azote pour la période 1965-1967

Traitements (précédents + azote)	Rendement en MS (t/ha)				Exportations d'azote (kg/ha)				Bilan de l'azote (kg/ha) Apport / Export.
	1965 blé	1966 maïs	1967 avoine	Total	1965 blé	1966 maïs	1967 avoine	Total	
1. 200 + 0 + 0	8,662	7,907	4,880	21,449	99,79	61,30	31,44	192,53	+ 7
2. 250 + 0 + 0	8,580	8,070	4,880	21,530	99,63	62,13	32,36	194,12	+ 56
3. 300 + 0 + 0	9,515	8,100	4,905	22,520	109,82	63,33	31,85	205,00	+ 95
4. 0 + 0 + 0	6,280	9,611	5,775	21,666	74,67	77,25	38,54	190,46	+ 95
P.p.d.s.	0,735	0,906	0,887	NS	6,80	6,61	5,00		

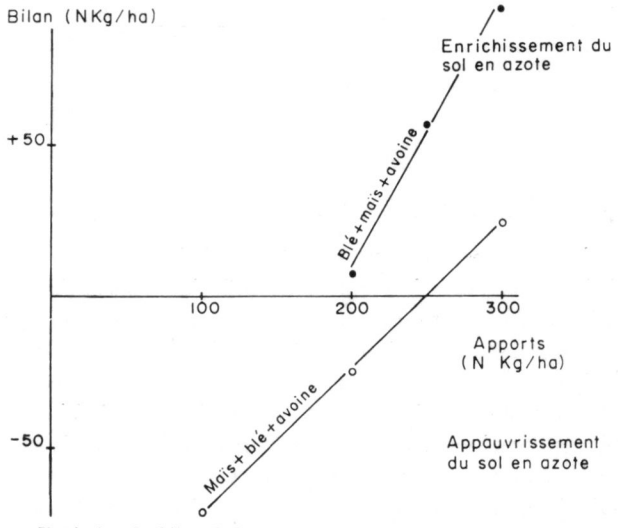


FIG. 4. — *Variation du bilan de l'azote avec la dose d'engrais azoté apporté* (sur 3 ans).

On constate souvent, d'ailleurs, d'une façon très nette que l'efficacité de la fertilisation minérale azotée est associée à la teneur en matière organique du sol. L'autre moyen de la rentabiliser est le fractionnement des apports en fonction des besoins de la plante, afin d'éviter des pertes préjudiciables à l'atteinte du rendement optimum.

TABLEAU 24

Comparaison des rendements globaux en blé et maïs, dans les deux essais, à même niveau d'azote

Essai	Doses d'azote (kg/ha)	Rendement en blé en MS (t/ha)	Exportations d'azote (kg/ha)
A	100 + 100	23,963	189,05
	150 + 150	27,704	239,90
B	200 + 0	21,449	161,09
	300 + 0	22,520	173,15

IV. — Conclusions

Cet essai avait été entrepris en vue d'estimer les effets résiduels de la luzerne, après trois ans d'exploitation et retournement, notamment au point de vue nutrition azotée des cultures suivantes. Si l'on compare les bilans obtenus sur le traitement 4 pour les deux rotations : maïs + blé + avoine et blé + maïs + avoine (tabl. 25),

TABLEAU 25

Comparaison des exportations mesurées sur deux rotations après luzerne
(par hectare)

Rotations	MS (t)				N (kg)			
	1965	1966	1967	Total	1965	1966	1967	Total
Maïs + Blé + Avoine	9,786	3,675	6,988	20,449	107,77	36,48	44,54	188,79
Blé + Maïs + Avoine	6,280	9,611	5,775	21,666	74,67	77,25	38,54	190,46
P.p.d.s. (P = 0,05)				NS			NS	NC

bien que les rendements en matière sèche se répartissent, d'une année à l'autre, différemment, on arrive en définitive à des résultats d'exportations identiques. Ceci montre, en particulier, que les mesures d'effets résiduels ne sauraient se restreindre à une seule année, car un précédent peut influencer le comportement des cultures suivantes pendant une longue période. La matière sèche, seule, n'est pas

suffisante pour décrire avec précision les effets parce qu'elle peut correspondre à des teneurs en azote, variables, en particulier, d'une année à l'autre. Ce même facteur année influence notablement la répartition des constituants dans le grain et dans la paille.

En résumé, dans les conditions de l'expérience (conditions représentatives, cependant, d'une situation normale, c'est-à-dire correspondant au cas le plus fréquent) l'exportation d'azote derrière une luzernière de trois ans, par un groupe de cultures annuelles se succédant pendant trois ans, est d'environ 190 kg/ha. Bien entendu, une fraction de cet azote provient de la fourniture normale du sol, mais il est impossible de la chiffrer dans le modèle expérimental considéré. Tout au plus, les exportations dans les deux rotations étant identiques, peut-on avancer que cette fourniture a probablement été la même dans les deux cas. On ne peut pas aborder également le problème de l'efficacité comparée des différentes sources d'azote (sol, luzerne, engrais) ; il est d'ailleurs possible que les différences s'atténuent avec le temps. On peut seulement établir la relation entre les exportations (MS et N) et les doses globales d'azote des engrais sur les deux rotations. Elle révèle la différence d'efficacité de la luzerne exprimée en termes d'équivalents azote des engrais (fig. 5) :

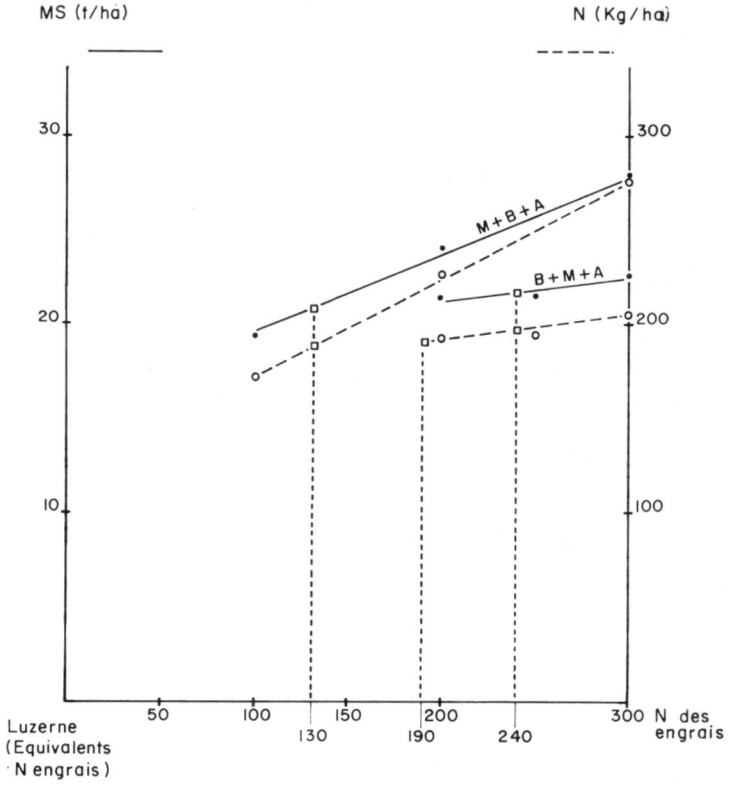


FIG. 5. — *Relation entre les exportations de matière sèche et d'azote et les doses d'azote des engrais.*

Enfin, l'ordre dans lequel les cultures se succèdent, après un même précédent, n'a un effet significatif que pour la matière sèche et pour une séquence de deux élé-

ments. Par contre, l'azote exporté semble beaucoup plus indépendant de l'ordre (tabl. 25).

Il est certain qu'une parcelle maintenue sans culture dans l'essai, pendant la phase préparatoire, aurait contribué à fournir des informations sur la quantité d'azote du sol minéralisée et libérée au profit du rendement des cultures annuelles.

Il est d'ailleurs possible, maintenant, à partir des résultats de ce modèle expérimental simple, de concevoir un modèle plus complexe permettant de mieux décrire les phénomènes (fig. 6). Correspondant à un schéma fixé, il peut être implanté soit sous forme factorielle, soit en hiérarchisant les répétitions dans les précédents. Il permet de mesurer les effets « précédent » et « azote » et de tester l'additivité de ces effets.

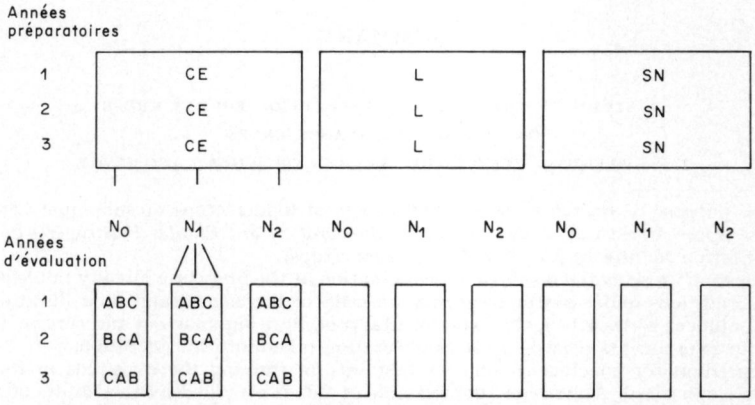


FIG. 6. — *Modèle d'étude de l'effet résiduel d'un précédent.*

A : Culture d'hiver (ex. : blé)
B : Culture de printemps (ex. : orge)
C : Culture d'été (ex : maïs)
N : niveau d'azote
CE : culture épuisante sans azote (3 ans)
L : 3 ans du précédent (ex : luzerne)
SN : sol nu

N. B. — La parcelle *sol nu* de la phase préparatoire peut avoir une surface telle que l'on puisse en conserver une partie en phase d'évaluation, dans le même état. On testera ainsi les interactions *azote de l'engrais* × *minéralisation* par comparaison avec les cultures sur précédent *sol nu*.

Sur le plan strictement agronomique, il serait inexact de dire qu'une culture venant immédiatement sur défriche de luzerne ne nécessite aucun apport d'engrais azoté. Le fait d'avoir fait succéder, dans cette expérience à ce même précédent, deux plantes différentes comme le blé et le maïs, montre que le seul azote fourni par la minéralisation ne coïncide pas forcément avec les besoins maxima des plantes. L'ordre de succession des cultures (rotations) conduira à des rendements particuliers différents, à court terme, différences atténuées par la suite. A ce propos, le choix de la culture immédiatement suivante sera relié à la date à laquelle la luzernière sera retournée : tôt dans la saison (le départ possible de la minéralisation, alors, fournira au blé d'hiver une offre suffisante d'azote qui ne risquera pas d'hypothéquer le potentiel de rendement), tard dans la saison (l'absence d'azote disponible deviendra préjudiciable au blé ; dans ce cas, la physiologie d'une plante d'été semble mieux adaptée à la fourniture du sol).

Dans le contexte actuel, les apports d'engrais azotés, sur une exploitation conduite intensivement, couvrent les exportations des plantes, ce qui minimise, dans une grande mesure, l'effet précédent dans ce qui a trait à sa contribution directe à la

nutrition azotée. Il est cependant logique de considérer sa participation comme un complément bénéfique de la fertilisation minérale, laquelle ne peut être réalisée que sur des cultures relativement jeunes, pour des raisons d'ordre pratique. Les plantes, dont les besoins en azote croissent pendant longtemps, profiteront alors de la minéralisation à un moment où toute intervention mécanique est rendue impossible. Ceci explique, en partie, le bon comportement des blés d'hiver derrière luzerne, en présence d'une fertilisation appropriée, sans négliger, bien sûr, la part pouvant revenir à une interaction azote x résidus.

Reçu pour publication en juillet 1969.

SUMMARY

A STUDY OF THE RESIDUAL EFFECTS OF FODDER CROPS ON SUBSEQUENT ARABLE CROPS

I. — RESIDUAL EFFECTS OF LUCERNE ON WHEAT AND MAIZE

For the purpose of studying the residual effects of fodder crops on subsequent arable crops experiments were carried out at the *Station d'Amélioration des Plantes Fourragères de Lusignan* (Lusignan Station for the Improvement of Fodder Crops).

The question arose as the result of an examination of the literature already published (modification of conditions under pasture, varying intensity of the effects, and their duration).

The equipment is described, the experimental procedure summarized and certain theoretical aspects of the experiments regarding cycles of rotation taken into consideration.

Some preliminary conclusions on the best way of framing the questions in this type of research are emphasized. A first concrete example of this is provided by the results of an experiment on the residual effects of lucerne growing.

These results are evaluated from two concomitant rotations (maize, wheat, oat) and (wheat, maize, oat). Under the conditions of the experiment the uptake of nitrogen after lucerne for the three successive crops receiving no additional nitrogen amounts to 150 kg/hectare. The order in which the crops succeed one another makes no difference except to the yield of dry matter from the first two crops.

There is no doubt about the need to include an uncultivated plot in the test area in order to ascertain the amount of mineralized nitrogen in the soil. It is, in any case, possible to postulate from the results obtained a more complex pattern for describing the phenomena.

On the strictly agricultural level, a crop following directly after lucerne would not in the present circumstances, be able to do without a nitrogen fertilizer, but the addition of this fertilizer will minimise the beneficial effect of the previously grown lucerne.

The experimental environment, from the point of view of climate and soil, is described in appendices. So also is the experimental methodology, which covers mainly improvements in practical application (size of plots, mechanisation, data collected).

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER NACHWIRKUNGEN VON FUTTERKULTUREN AUF ANBAUFÄHIGE KULTUREN

I. — NACHWIRKUNGEN DER LUZERNENKULTUR AUF WEIZEN UND AUF MAIS

Die Untersuchung der Nachwirkungen von Futterkulturen auf anbaufähige Kulturen beruht auf experimentalen Vorrichtungen. die im Pflanzenzucht-Institut in Lusignan angewendet wurden.

Die gestellten Probleme werden im Anschluss an eine Uebersicht der bereits veröffentlichten Arbeiten (Aenderungen der Bodenbeschaffenheit unter den Wiesen, Intensitätsvariation der Wirkungen, Einflüsse des Umpflügens, Auftreten und Dauer der Wirkungen) besprochen.

Die Vorrichtungen werden beschrieben und die experimentalen Berichte unter Berücksichtigung gewisser theoretischer Erwägungen, die sich auf die experimentelle Untersuchung der Fruchtfolgezyklen beziehen, zusammenfassend erläutert.

Einige erste Schlussfolgerungen über die Art der Fragestellung für diesen Untersuchungstyp werden unterstrichen. Ein erstes konkretes Beispiel wird mittels der in einer Untersuchung der Nachwirkungen der Luzernenkultur erzielten Ergebnisse angeführt.

Diese Wirkungen werden bei zwei gleichzeitigen Aufeinanderfolgen (Mais, Weizen, Hafer) und (Weizen, Mais, Hafer) untersucht. Bei den Versuchsbedingungen beträgt die Stickstoffausfuhr nach Luzernenkultur für drei nacheinanderfolgende und nicht mit Stickstoff gedüngte Kulturen 150 kg/ha. Die Reihenfolge der nacheinanderfolgenden Kulturen wirkt sich dabei nur auf den Ertrag an Trockensubstanz der zwei ersten Anbauelemente nachhaltig aus.

Es ist sicher, dass die Einräumung einer nicht angebauten Parzelle in der Versuchsvorrichtung notwendig gewesen wäre, um die mineralisierte Bodensstickstoffmenge zu ermitteln. Es ist übrigens möglich, ausgehend von den erhaltenen Ergebnissen, ein vollständigeres Beschreibungsmuster der Phänomene zu schaffen.

Unter rein agronomischen Gesichtspunkten könnte bei den gegenwärtigen Bedingungen eine nach Urbarmachung der Luzernenkultur angebaute Kultur eine stickstoffhaltige Düngung nicht entbehren. Diese Düngerzufuhr jedoch verkleinert die vorteilhafte Wirkung durch die « vorher angebaute » Luzerne.

In den Beilagen wird das Versuchsmilieu gemäss der Klima- und Bodenbedingungen beschrieben ; ferner die experimentale Methodologie, die besonders die Lösung der technischen Durchführungsverfahren anbetrifft (Abmessungen der Parzellen, Mechanisierung, zusammengestellte Ergebnisse).

РЕЗЮМЕ

Изучение остаточного действия кормовых культур на пропашные. Остаточное действие люцерны на пшеницу и кукурузу.

П. ЖАККАР, Л. КРУАЗЬЕ, Г. МОННЬЕ.

Изучение остаточного действия кормовых культур на пропашные является об'ектом эксперимента проводимого в Опытной Станции Селекции Кормовых Растений в Люзиньяне.

Во вступительной части данной работы приводится сводка опубликованных уже по этому вопросу трудов (изменения состояния почвы под лугами, изменения силы эффекта, способы перепашки, проявления действия, и т. д.) и излагаются задачи проводящегося опыта.

Следуют описание и краткие данные эксперимента, принимая во внимание некоторые теоритические стороны вопроса в отношении различных циклов севооборота.

Затем подчеркиваются некоторые предварительные заключения по поводу манеры постановки вопроса в этом типе исследований, и дается первый конкретный пример такого рода постановки, при помощи результатов полученных в опыте над остаточным действием люцерны.

Это после-действие оценивается на двух одновременных последовательностях : кукуруза, пшеница, овес и пшеница, кукуруза, овес. В условиях опыта вынос азота представляет 150 кг/га для трех последующих за люцерной культур не получавших азотных подкормок. Порядок последовательности оказывает показательный эффект тольно на продукцию сухого вещества первых двух следующих за люцерной культур.

Конечно, включение в схему опыта неокультуренной делянки былобы необходимым для выяснения количества минерализованного почвой азота. И авторы признают, что в свете полученных результатов возможно создать более сложную модель описания этих явлений.

Что-же касается чисто агрономической точки зрения, культура возделываемая после распашки люцерны не может в настоящее время обойтись без подкормок азотом; но эти подкормки сводят до минимума полезное действие предшественника «люцерна».

В приложениях описываются с точки зрения климата и почвы опытная среда и методика эксперимента, с уделением особенного внимания раз'яснению применявшихся технических приемов (размеры делянок, механизация, полученные данные).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDREW W. D., 1965. The effects of some pasture species on soil structure. *Austral. J. exper. Agric anim. Husb.*, **5**, 17, 133-6.

BLANCHET R. et coll., 1965. Influence prédominante des argiles illitiques sur l'alimentation potassique des plantes dans divers types de sol. *Ann. agron.*, **16** (2), 177-202.

BOYD D. A. et coll., 1961. The Rothamsted ley-arable rotation experiment. *Rep. Rothamst. exper. Stn.* 173-180.

BUI HUU TRI, 1968. Dynamique de la granulation des sols sous prairie. *Ann. agron.*, **19** (4), 415-439.

CLEMENT C. R. et WILLIAMS C. E., 1959. Crum stability within the profile of arable soil under leys *Meded. Landbouwhogesch. Gent*, **24**, 1, 166-175.

CLEMENT C. R. et WILLIAMS T. E., 1962. An incubation technique for assessing the nitrogen status of soil newly ploughed from leys. *J. Soil Sci.*, **13**, 1, 82-91.

C.S.I.R.O., 1961. Soil fertility investigations. *Ann. Rep.*, Div. Plant Industry, 133.

C.S.I.R.O., 1963. Soil fertility. *Ann. Rep.*, Div. Plant Industry, 58.

DROUINEAU G. , LEFEVRE G., 1949. Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. agron.*, **19**, 4, 518-37.

DUBETZ S., HILL K. W., 1964. Effect of irrigated crop rotations on yield and soil fertility. *Canad. J. Plant Sci.*, **44**, 2, 139-44.

E.N.S.A. de GRIGNON, 1961. *Rapport du Centre de Recherches et d'expérimentation.*

GARRETT S. D., 1950. The control of take-all under intensive cereal cultivation. *Agriculture*, Londres, **56**, 514-6.

GOBILLOT Th., 1961. *Étude des sols des domaines de l'INRA à Lusignan. Notice de la carte des sols.*

HEARD A. J., 1965. The effect of the nitrogen content of residues from leys on amounts of available soil nitrogen and on yields of wheat. *J. Agric. Sci.*, **64**, 3, 329-34.

HENIN S., 1960. Production fourragère et sol. *Fourrages*, 1, 31-9.

HENIN S. et coll., 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol.* Société d'Édition des Ingénieurs agricoles. Paris.

HENIN S., MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité structurale des sols. *C. R. VI congrés Intern. Sci., Sol.*, Paris, vol. B. 49-52.

HANLEY F., RIDGMEN W. J., JARVIS R. H., 1964. The effects of leys and their management on the yield of succeeding wheat crops on heavy land. *J. Agric. Sci.*, **62**, 1, 47-54.

HOOD A. E. M., 1960. An experiment on the effect of leys on soil fertility. *Proc. 8th internation. Grassl, Cong.*, 242-244.

JACQUARD P., 1964. Problèmes posés par l'introduction des prairies dans la rotation. *Fourrages.* **20**, 124-140.

KOBLET R., WEHRLI A., 1959. Uber die Struktur von Acherböden beim Anbau von Kleegrass. *Z. Acker Pflanzb.*, **109**, 4, 337-54.

LEWIS A. H., *et al.*, 1960. A comparaison of ley and arable farming systems. *J. Agric. Sci.*, **54**, 3, 310-15

LOW A. J., 1955. Improvements in the structural state of soils under leys. *J. Soil Sci.*, **6**, 179-199.

MERIAUX S., 1958. Stabilité structurale et composition des sols. *C. R. Acad. Agric.*, 19 novembre.

MILLER D. E., KEMPER W. D., 1962. Water stability of aggregats of two soils as influenced by incorporation of alfalfa. *Agron. J.*, **54**, 6, 494-496.

MONNIER G., 1957. Influence des prairies temporaires sur la structure d'un sol de limon. *C.R Acad. Agric.*, 20 février.

MONNIER G., 1958. Mécanisme de l'enrichissement en matières organiques d'un sol de prairie. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 1769-1777.

MONNIER G., 1958. Étude de quelques problèmes posés par l'utilisation des prairies dans l'amélioration des propriétés physiques du sol.. *Bull. A.F. E. S.*, **7**, 355-360.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse de Docteur-Ingénieur, INRA, pp. 140.

MORTENSEN J. L., 1963. Decomposition of organic matter and mineralization of nitrogen in Brookston silt loam and alfalfa green manure. *Plant and soil*, **19**, 3, 374-34.

N., 1968. La culture des céréales en France. *Eull. Engrais*, 503, 15.

PATTERSON H. D., 1964. Theory of cyclic Rotation Experiments. *J. r. Stn. Soc.*, **26**, 1, 1-45.

RUSSELL J. S., 1960. Soil fertility changes in the long-term experimental plots of Kybybolite, South Australia. I. Changes in pH, total nitrogen, organic, carbon, and bulk density. II. Changes in phosphorus. *Austral. J. agric. Res.*, **11**, 902-925.

SEBILLOTE M., 1966. Rotations et assolements. *Rev. agric. Fr.*, **52**, pp 18.

TROUGHTON A., 1958. The roots of grasses. II. In relation to the soil. *Worc. Agri. Chron.*, **27**., 1, 7-15.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle; formule climatique simplifiée et mise à jour. (ETP, f. 60). *Ann. agron.*, **12**, 1, 13-49.

WEHRLI A., 1958. Untersuchungen über die Wirkung von Gräsern und Leguminosen auf die Bodenstruktur. *Landw Jahrb. Schweiz.*, **72**, 747-90.

WILLIAMS C. H. DONALD C. M., 1957. Changes in organic matter and pH in a podzolic soil as influenced by subterranean clover and superphosphate. *Austral. J. agric. Res.*, **8**, 179-189.

WILLIAMS C. H., STEINBERGS A., 1958. Sulphur and phosphorus in some eastern Australian soils. *Austral. J. Agric. Res.*, **9**, 483.

WILLIAMS C. H., LIPSETT, J., 1960. The build-up of available potassium under pasture. *Austral. J. agric. Res.*, **11**, 473, 484.

WILLIAMS T. E., 1959. The ley in relation to crop productivity, in *Measurement Grassl. Productivity*, 15-24.

WILLIAMS T. E., 1964. Ley Agronomy, in *Exper. in Progress*, **16**, 1962-1963, 41.

YATES F., 1949 The design of rotation experiments. *Comm. Bur. Soil Sci. Tech. Comm.*, **46**, 16 p.

ANNEXES

I. — Description du milieu

Le milieu dans lequel se sont déroulées les expériences est décrit ci-dessous dans ses aspects climatiques et édaphiques, à la fois d'un point de vue général (et c'est cet aspect, par exemple, qui a justifié l'introduction dans les protocoles de deux plantes-tests différentes chaque année) et d'un point de vue particulier propre à la période d'expérimentation.

1. — *Climat*

Après avoir défini le climat moyen de la micro-région en cause, nous caractériserons la climatologie propre à la période de déroulement de l'expérimentation.

a) *Climatologie locale.*

A l'échelle du département, et à partir des mesures réalisées à Poitiers, la moyenne annuelle de pluviométrie est de 655 mm et celle d'insolation de 1 900 heures.

A la suite d'une étude entreprise en 1963 en vue de comparer les micro-climats de Poitiers (Camp d'aviation de Biard, 20 km au N.-E. de Lusignan), de Saint-Sauvant (Maison forestière, 6 km au S.-S.-W. de Lusignan) et de la ferme des Verrines, on a obtenu les corrélations indiquées au tableau 26 pour les données de pluviométrie mensuelle relevées respectivement dans les trois postes (la probabilité de non-signifi-

TABLEAU 26

Comparaisons des pluviométries de Poitiers, Saint-Sauvant et des Verrines

A) Pluviométries annuelles

	Pluviométrie annuelle en mm			
	1961	1962	1963	Moyenne
Poitiers	872	852	865	863
Saint-Sauvant....	1 018	946	1 005	989
Les Verrines	982	973	993	983

B) Pluviométries mensuelles

	Coefficients de corrélation	
	Poitiers	Saint-Sauvant
Les Verrines	+ 0,929	+ 0,975

cation des deux coefficients étant inférieure à 1 p. 100). Ceci autorisait à utiliser les données relevées à Saint-Sauvant depuis 1952 pour compléter les propres relevés effectués sur le domaine des Verrines depuis 1961, afin de caractériser le micro-climat moyen de l'environnement expérimental, notamment au point de vue déficits hydriques.

Pour ce faire, les évapotranspirations potentielles (ETP) ont été calculées avec la formule de TURC (cf. annexes, §I I, 3, *c*) et les bilans ont été obtenus, en tenant compte d'une réserve utile en eau du sol, de 120 mm, pour une profondeur exploitable par les racines de 65 cm environ (ceci sur la base de 3 000 t de terre par tranches de 20 cm et d'après des analyses de teneur en eau entre les pF 2,5 et 4,2, réalisées par la Station agronomique de Laon), soit :

$$B = P + 120 - ETP - D$$

avec

B = Bilan
P = Pluviométrie
ETP = Évapotranspiration Potentielle
D = Drainage après reconstitution des réserves du sol.

Le tableau 27 rassemble ces éléments caractéristiques. On peut remarquer que,

TABLEAU 27

Caractéristiques moyennes et variabilité annuelle du régime hydrique des Verrines

Année	Pluviométrie annuelle (1)	ETP annuelle (1)	Bilan annuel (1)
1952	748	817	— 110
1953	751	818	— 270
1954	588	716	— 223
1955	936	861	— 108
1956	727	718	— 85
1957	617	743	— 125
1958	938	700	+ 87
1959	736	855	— 275
1960	924	786	— 60
1961	982 (2)	840	— 233
1962	973	765	— 130
1963	993	666	— 91
1964	747	748	— 206
1965	970	638	+ 85
1966	1 112	700	— 30
1967	987	692	— 116
Moyennes :			
1952-1967	858	756	— 107
1952-1959	749	783	— 139
1960-1967	967	729	— 75

(1) Comptabilisée d'octobre à septembre en mm.
(2) Données des Verrines à partir de 1961.

bien que la pluviosité moyenne sur 16 ans soit de 858 mm, il apparaît deux sous-ensembles bien distincts quant à l'importance des précipitations 1952-1959 et 1960-1967. Ceci est beaucoup moins net pour les ETP, mais particulièrement accentué pour les bilans.

D'autre part, par souci de simplification par rapport aux décomptes mensuels, et surtout pour améliorer la valeur biologique des observations, l'année a été divisée en trois périodes :

automne-hiver (A-H) : octobre-novembre-décembre-janvier,
printemps (P) : février-mars-avril-mai,
été (É) : juin-juillet-août-septembre.

La première correspond au ralentissement puis au repos de la végétation ; la seconde à son départ puis à son explosion printanière ; et enfin, la troisième phase est étroitement dépendante des conditions d'alimentation en eau.

Le tableau 28, ci-dessous, comporte des données regroupées selon ce système.

TABLEAU 28

Quantités d'eau et ETP (moyennes mensuelles)
par période de l'année
(les pourcentages afférant à chaque période sont indiqués entre parenthèses)

	Pluviométrie mensuelle (mm) par périodes			ETP mensuelle (mm) par périodes		
	AH	P	E	AH	P	E
1952 1967	88,5 (41,2)	65,2 (30,4)	60,7 (28,4)	23 (12)	58 (31)	108 (57)
1952 1959	71,5 (38,1)	55,2 (29,5)	60,7 (32,4)	24 (12)	61 (31)	111 (57)
1960 1967	105,5 (43,7)	75,2 (31,1)	60,7 (25,1)	22 (12)	55 (30)	105 (58)

AH = Automne-Hiver P = Printemps E = Été.

En résumé, on s'aperçoit que 70 p. 100 des précipitations annuelles se produisent en période d'évapotranspiration relativement faible. Par contre, près de 60 p. 100 de l'ETP se situe pendant la phase estivale. Agronomiquement, ceci entraîne une variabilité importante des récoltes sur cultures dites d'été. Pour la moyenne des 16 années, si le déficit est d'environ 160 mm, sa gamme de fluctuation va de 0 à 275 mm avec les fréquences particulières suivantes :

avec une fréquence biennale 125 à 150 mm,
avec une fréquence quinquennale 200 à 225 mm,
avec une fréquence décennale 250 à 275 mm.

Dès maintenant, on peut faire ressortir un point souvent repris dans le texte : le choix de la culture utilisée pour mesurer les effets résiduels apparaît comme très important. En effet, pour certaines d'entre elles, les différences possibles seront masquées par une sécheresse trop sévère.

b) *Climatologie de la période de déroulement de l'expérimentation.*

S'il est une expérimentation agronomique où les caractéristiques climatiques annuelles ont une incidence sur les données recueillies, c'est bien le cas de celle qui traite des effets résiduels des cultures et nous aurons l'occasion d'y revenir lors de la présentation des conclusions générales relatives à cette expérimentation.

L'allure du climat des différentes années d'observation (1962 à 1967) est décrite d'une part, dans le tableau 27, d'autre part, par les graphiques des figures 7 et 8.

Dans le tableau 29, on a reporté la pluviométrie et le bilan hydrique pour la période de mai à octobre.

Pour les graphiques, on a regroupé, d'une part, ceux correspondant à la « phase préparatoire » (fig. 7) s'écoulant du semis des cultures à tester à leur fin (retournement), d'autre part, ceux correspondant à la « phase d'évaluation » (fig. 8), comportant trois années de cultures annuelles. Chaque graphique caractérise l'année de façon dynamique à l'aide des principaux facteurs climatiques ayant une incidence directe et prépondérante sur le comportement des plantes. Le trait continu matérialise la pluviométrie, le trait interrompu, l'ETP, calculée avec la formule de TURC ; les différentes hachures symbolisent soit l'utilisation ou la reconstitution des 120 mm de la réserve en eau utile, soit le drainage théorique. La surface blanche indique le déficit.

Au cours de la « phase préparatoire », on remarque que seule 1963 fut une année dépourvue de déficit et que l'hiver 1963-1964 fut assez pluvieux (avec un drainage théorique de 436 mm).

Au cours de la « phase d'évaluation », seule la dernière des trois années accuse un déficit sévère, mais sans grand effet sur les cultures précoces de printemps. Par contre, 1965 et 1966 furent en grande partie favorables aux cultures-tests de blé et de maïs. Le maximum de pluviosité hivernale a été atteint durant l'hiver 1965-1966, entraînant un drainage théorique de 640 mm.

Ajoutons, pour en finir avec le climat, qu'il n'y eu aucun dégât de froid durant les six années d'observations.

2. — *Sol*

D'après GOBILLOT (1961), le domaine des Verrines est situé sur les « terres rouges à châtaigniers », en région de plateaux d'une altitude moyenne de 150 m. Le sol de surface, d'une épaisseur de 20 à 40 cm, est de texture homogène, aussi les différents graphiques granulométriques des divers profils qui ont pu être réalisés ne s'écartent jamais d'un type moyen que l'on pourrait définir comme limoneux peu argileux. Un certain nombre de profils présentent des taches d'oxydo-réduction (hydromorphie).

Tout le centre du domaine, où se trouvent situés les essais d'effets résiduels, est constitué surtout de terres de couleur brun clair. Tous les sols sont neutres ou faiblement acides.

TABLEAU 29

Pluviomètrie et bilan hydrique par décades pour la période expérimentale
(mai à octobre)

Mois	Décades	1962		1963		1964		1965		1966		1967	
		Pluviom. (mm)	Bilan (mm)	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B
Mai	1	38,0	+ 120	12,3	+ 105	29,0	+ 120	38,8	+ 116	52,5	+ 120	20,3	+ 120
	2	20,0	+ 116	4,7	+ 83	0,0	+ 120	3,9	+ 86	24,3	+ 118	13,0	+ 120
	3	6,0	+ 97	4,7	+ 58	141,2	+ 120	8,4	+ 72	15,2	+ 98	88,8	+ 120
Juin	1	0,0	+ 66	79,0	+ 101	28,9	— 109	14,3	+ 61	13,4	+ 74	9,6	+ 91
	2	18,0	+ 48	8,2	+ 74	12,6	+ 85	6,1	+ 26	46,4	+ 110	5,5	+ 64
	3	0,0	+ 13	42,4	+ 80	0,0	+ 44	23,5	+ 14	15,2	+ 93	11,3	+ 32
Juillet	1	3,0	— 19	7,5	+ 50	11,9	+ 9	5,8	— 18	6,0	+ 59	5,0	— 2
	2	47,0	— 8	9,1	+ 22	1,3	— 31	15,4	— 45	35,0	+ 65	10,4	— 37
	3	12,0	— 34	0,6	— 18	0,3	— 82	51,1	— 27	5,7	+ 38	0,0	— 76
Août	1	13,0	— 53	106,8	+ 55	4,0	— 114	32,7	— 25	49,7	+ 59	7,5	— 101
	2	3,8	— 85	14,7	+ 38	9,1	— 141	14,6	— 43	0,3	+ 22	49,6	— 83
	3	0,0	— 120	45,7	+ 52	3,4	— 180	17,1	— 51	20,6	+ 12	0,0	— 117
Septembre	1	38,0	— 105	23,7	+ 52	23,4	— 183	92,0	+ 24	4,5	— 14	15,5	— 127
	2	6,0	— 124	77,9	+ 105	26,7	— 183	20,5	+ 22	1,5	— 37	16,0	— 127
	3	28,0	— 118	10,6	+ 91	5,9	— 206	81,9	+ 85	33,3	— 30	36,8	— 114
Octobre	1	15,5	— 127	25,6	+ 102	101,5	— 35	8,5	+ 74	45,8	+ 1	18,1	— 114
	2	0,5	— 139	2,0	+ 89	58,1	+ 9	8,3	+ 67	44,1	+ 31	39,5	— 101
	3	20,1	— 130	13,0	+ 87	3,8	+ 3	5,0	+ 57	39,9	+ 60	36,3	— 72
Printemps		Assez froid		Froid		Favorable à la végétation		Sec		Pluvieux		Favorable à la végétation	
Été		Très sec		Très pluvieux		Sec		Pluvieux		Sec vers la fin		Sec	

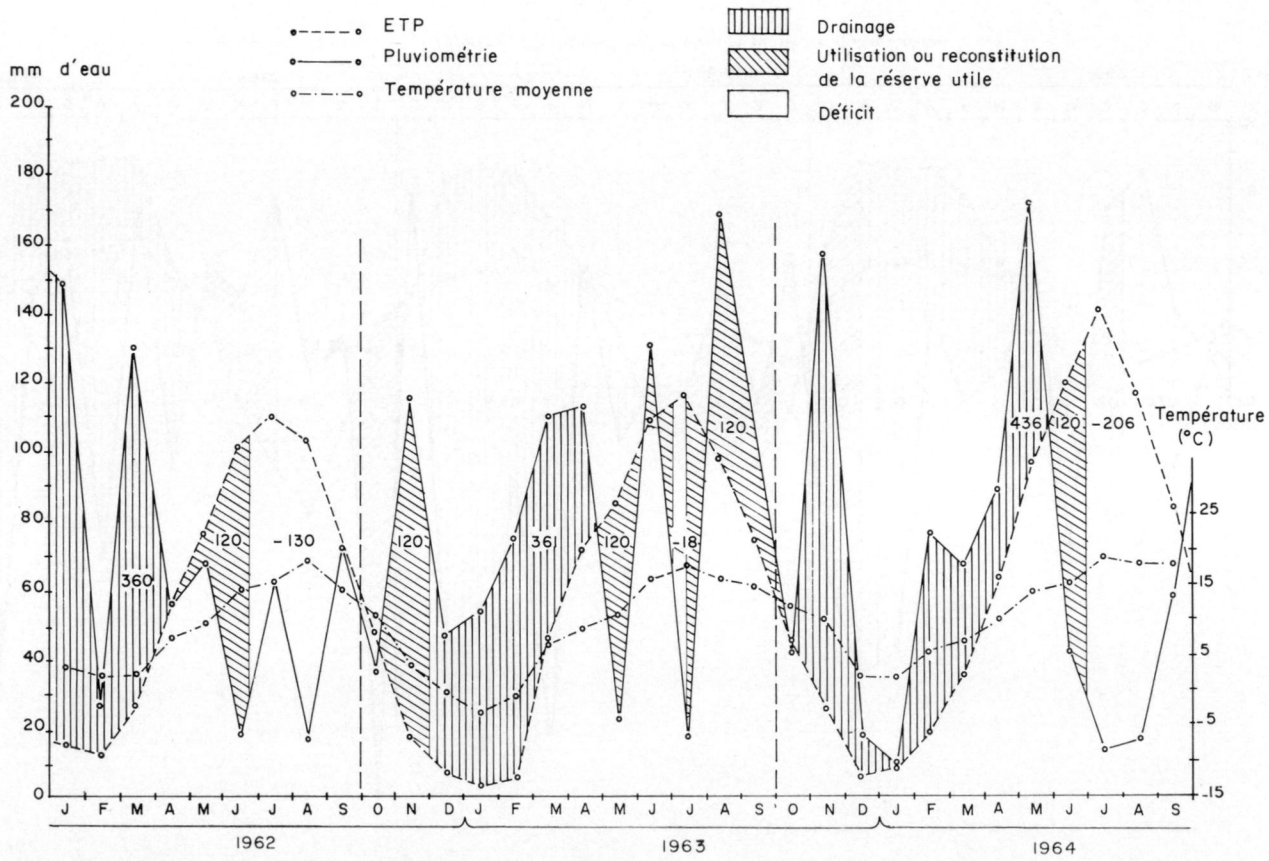


FIG. 7. — *Graphique climatique des années de la phase préparatoire*

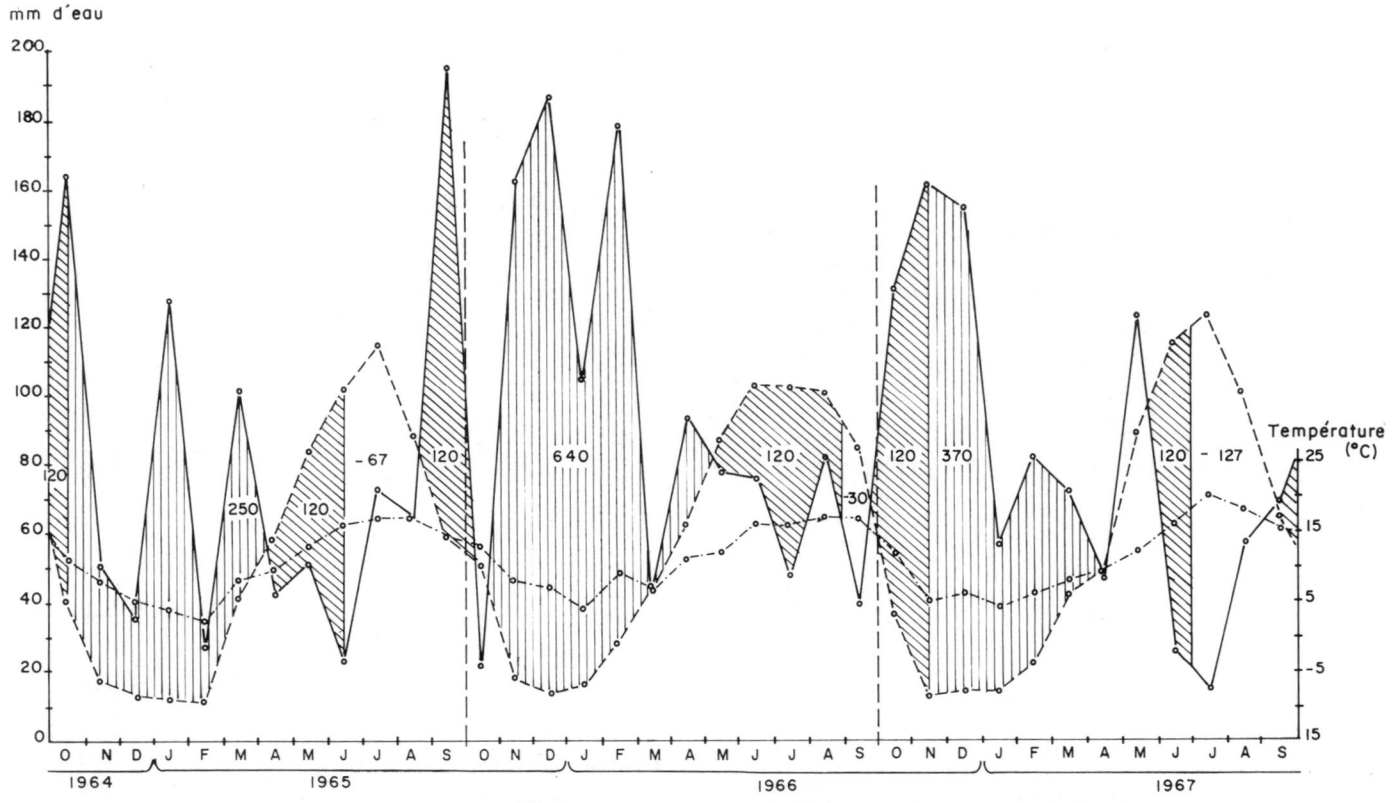


FIG. 8. — *Graphique climatique des années de la phase d'évaluation*

Le tableau 30 reproduit les résultats d'une analyse de sol réalisée sur un prélèvement effectué à proximité des dispositifs expérimentaux.

TABLEAU 30

Analyse d'un profil de sol situé à proximité des dispositifs expérimentaux
(Station agronomique de l'Aisne)

Horizons → (p. 1 000 de terre fine) ↓	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Analyse physique					
Argile	163	245	288	305	291
Limon fin	286	326	304	305	258
Limon grossier	402	307	300	263	278
Sable fin	63	56	51	58	67
Sable gros	63	51	51	69	106
Matières organiques	21,2	12,2	4,1	—	—
C/N	7,87	8,29	4,01	—	—
Calcaire	1,45	2,9	1,45	0	0
pH	7,15	7,30	7,40	7,30	7,20
Texture	L. M.	L. Lo	L. Lo/A. Li	A. Li/L. Lo	L. Lo. S/A. Li
Analyse chimique					
Azote	1,34	0,73	0,51	0,41	0,44
$P_2 O_5$ ass. (citrique)	0,16	0,04	0,005	—	—
$K_2 O$ échangeable	0,32	0,24	0,16	—	—
pF 2.5	26,0	23,5	21,6	22,75	21,75
pF 4.2	8,5	8,5	10,5	11,0	12,0
Eau utile	17,5	15,05	11,1	11,75	9,75

L. M = limon moyen, L. Lo = limon lourd, A. Li = argile limoneuse, L. Lo. S = limon lourd sableux.

a) *Caractéristiques structurales.*

La structure des sols en place paraît assez médiocre. L'indice de stabilité est moyen. Le rapport $\frac{l}{a}$ (où l est la fraction comprise entre 2 et 20 μ et a, celle comprise entre 0 et 2 μ) est en moyenne de 2,35 en surface. Il s'abaisse à 1,13 pour l'horizon intermédiaire et à 0,45 en profondeur. Or la stabilité structurale varie fréquemment en raison inverse de ce rapport (MÉRIAUX, 1958).

Une étude préliminaire avait donné, en 1959, les résultats suivants pour un profil situé à proximité de la future zone d'expérimentation sur les rotations :

coefficient S de stabilité	1,44
agrégats au benzène A_{gb}	6,1 p. 100
coefficient K de perméabilité	3,31 cm/h

ce qui situe ces sols dans une position médiane entre les très mauvais limons battants et les sols bruns calcaires sur la base de la relation entre coefficients de stabilité et de perméabilité.

b) *Caractéristiques chimiques.*

Outre les indications portées au tableau 30, des données plus précises ont été recueillies concernant l'azote et la potasse.

Azote.

De 1964 à 1966, des dosage d'azote minéral ont été effectués régulièrement par la Station agronomique de Laon dans le cadre de son étude sur la minéralisation de l'azote. Le processus est, dans l'ensemble, régulier avec des oscillations notables, sauf en 1965-1966. Le pouvoir de réorganisation semble important.

Potasse (1).

La teneur du sol en K échangeable est de 350 mg/kg de sol. Les possibilités de rétrogradation sont faibles, celles de libération de K non échangeable sont moyennes par rapport à d'autres sols. En pots, on observe une excellente alimentation potassique des plantes.

Au point de vue caractère de l'argile, sa capacité d'échange de cations est de 24,5 méq/100 g. Sa capacité de fixation du potassium est faible, mais celle de libération est élevée. Quant à la nature de ses constituants, on trouve :

35 p. 100 de kaolinite,
50 p. 100 d'illite,
10 p. 100 de montmorillonite,
5 p. 100 de chlorite.

R. BLANCHET et coll. (1965) ont montré l'influence prépondérante des argiles illitiques sur l'alimentation potassique des plantes dans divers types de sols. Dans le cas des sols de Lusignan, la richesse en de telles argiles indique l'existence de réserves importantes, liées à une rétention assez énergique du potassium.

— D'autre part, ce sol est riche en *acide phosphorique* et bien pourvu en *magnésie*.

II. — MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE (tabl. 31)

La mise en place et la conduite d'essais sur les effets résiduels peut dépendre de nombreux facteurs locaux. C'est ainsi qu'à la Station de Lusignan, au cours de la phase de conception et de mise en route des différents secteurs d'activités du Laboratoire des Techniques culturales et Assolements fourragers, une grande partie de l'attention a été portée sur la nécessité de conduire un nombre important d'essais, avec les moyens courants de la grande culture, sans utiliser beaucoup de main-d'œuvre, ni un matériel trop spécialisé.

A. — *Dimension des parcelles*

Une fois l'homogénéisation du terrain d'expérience réalisée, ce sont les caractéristiques du matériel agricole dont on disposait qui ont déterminé le découpage de la surface. Les parcelles élémentaires ont été choisies de 50 m². Évidemment, les nombreux traitements constitués par les différentes phases des rotations, dans certains dispositifs, conduisent de ce fait, à des essais couvrant une grande étendue

(1) Les principaux caractères de l'argile et de la dynamique du potassium ont été étudiés par la Station d'Agronomie de Châteauroux.

et, par conséquent, des zones plus ou moins hétérogènes. D'autant plus que de nombreuses allées sont nécessaires pour une exécution rapide et correcte des interventions culturales tout au long de l'année.

Cependant, des parcelles de 50 m² représentent un minimum, d'une part pour réaliser des façons culturales normales sur les phases en cultures arables des rotations, d'autre part pour permettre une subdivision ultérieure à l'aide des traitements secondaires (parfois non prévisibles au départ de l'expérience).

TABLEAU 31

Méthodologie expérimentale

	Prairies	Blé-Orge	Maïs-Pommes de terre
Surface des parcelles	50 m² (10 m × 5 m)	50 m² ou 25 m² (10 m × 2,50)	50 m² (Pommes de t.) ou 25 m² (Maïs)
Nombre de lignes { totales ..	variable (minim. = 26)	26 ou 13	12 ou 6
Nombre de lignes { récoltées.	variable (minim. = 6)	Totalité moins les 2 lignes bordure	10 ou 4
Longueur utile des lignes ...	10 m		
	Pas de séparations longitudinales entre les parcelles. Séparations transversales (allées) d'une largeur minimum de 6 m.		
Mécanisation des opérations			
Préparation du terrain	Tracteur courant avec outils portés.		
Entretien { parcelles	Matériel de grande culture.		
Entretien { allées	Zone enherbée + ensileuse à fléaux ; zone nue = rotavator.		
Semis	Semoir *Isaria* sur porte-outil *Schmotzer* ou *Titania* tracté (tous deux de modèle normal) — Maïs = semoir pneumatique à 4 rangs (normal) Pommes de terre à la main.		
Traitements	Pulvérisateur porté sur tracteur.		
Fertilisation	Épandeur porté (*Schmotzer*) ou tracté (type grande culture) ou en pulvérisation.		
Récolte.....	Prélèvements de 6 m² à la motofaucheuse	Moisonneuse-batteuse à barre frontale de 1m 80	Manuelle Maïs (mis en sacs et battu au cours de l'hiver).

Le plan d'ensemble du terrain d'expérience est donné par la figure 9. Ce terrain a une superficie de 6 ha sur lesquels sont regroupés 6 dispositifs d'étude des « effets résiduels des cultures fourragères », soit 670 parcelles élémentaires (fig. A hors-texte).

Toutes les allées sont engazonnées, ceci assure le minimum de soins d'entretien et permet le passage d'engins lourds sans détérioration du sol, ce qui est une nécessité lors des travaux hivernaux. Une bande de la largeur d'un passage de rotavator (1,20 m), laissée nue en bordure des parcelles donne aux instruments aratoires la possibilité d'être à la profondeur voulue au moment de leur entrée dans la parcelle

proprement dite. La bande de roulement engazonnée étant de 3,60 m, l'allée est de 6 mètres. Elle est entretenue par fauche de l'herbe (laquelle est ensuite distribuée aux animaux) (fig. 10).

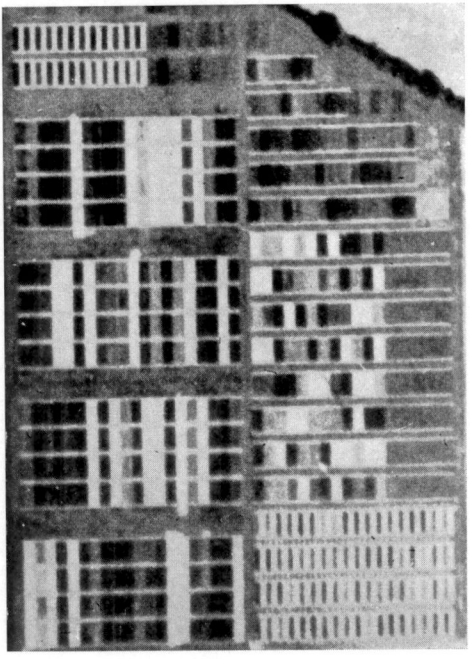


FIG. 9. — *Photographie aérienne du terrain d'expérience* (14 juin 1965) (échelle 1/2000)

Les dimensions des parcelles élémentaires sont de 10 mètres en longueur et 5 m en largeur. Cette dernière donnée, qui peut dépendre du front de travail d'un appareil, comme le semoir, doit tenir compte aussi du fait que, pour certaines cultures en lignes écartées (maïs, pommes de terre), elle doit permettre l'installation d'un nombre suffisant de lignes récoltables, tout en assurant l'élimination des bordures.

Les parcelles sont contiguës, sans intervalles entre elles.

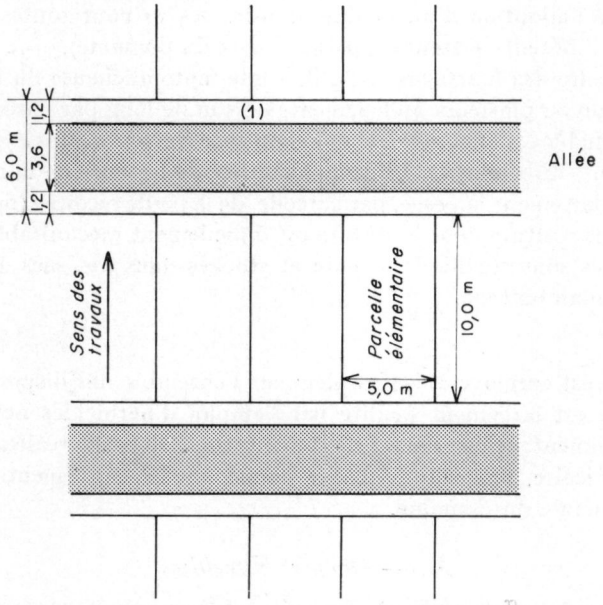
Les possibilités d'utilisation de telles parcelles sont schématisées sur la figure 11. On voit que l'étude des effets résiduels d'un précédent peut être réalisée à l'aide d'une culture d'hiver (Blé) et d'une culture d'été (Maïs) sur une même parcelle, la même année. La parcelle de blé comporte 18 m² récoltables et celle de maïs 15 m² (2 lignes récoltées sur 4). Après labour du précédent, les deux sous-parcelles sont traitées séparément, une largeur de 2,50 m étant assez courante dans le matériel agricole. L'année suivante, les cultures-tests sont inversées : le blé prend la suite du maïs et ce dernier celle du blé.

B. — *Mécanisation des opérations*

Travaux de préparation.

Pour tous les gros travaux (labour, façons culturales), du matériel de grande

culture est employé à l'exclusion de tout autre. Une charrue entièrement déportable (type charrue vigneronne (fig. B hors-texte)) est utilisée pour terminer le labour le long des parcelles adjacentes afin d'éviter tout passage sur ces dernières. On réalise ainsi un effet de tassement par les appareils agricoles, dans chaque traitement, identique à ce qu'il serait en vraie grandeur.



(1) Largeur de passage d'un rotavator, travaillée 3 ou 4 fois par an

FIG. 10. — *Détail du dispositif expérimental*

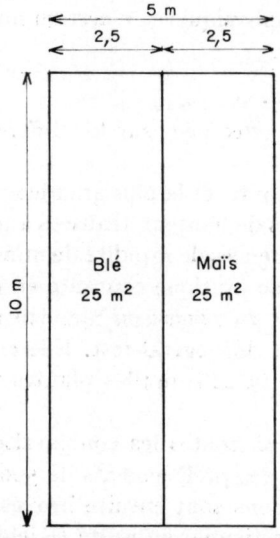


FIG. 11. — *Possibilité d'utilisation des parcelles élémentaires.*

Travaux de mise en place et de récolte.

Le laboratoire disposant d'un porte-outils *Schmotzer*, de 2,50 m de large, c'est cet appareil qui est utilisé, dans les essais, pour la mise en terre des semences ainsi que pour l'épandage des fumures minérales. Du fait de la largeur des parcelles, les opérations sont réalisées en deux passages (c'est d'ailleurs la voie de ce porte-outils qui a déterminé l'adoption d'un module d'ordre 2,5 m pour toutes les dimensions parcellaires des différents secteurs expérimentaux du domaine).

Pour la récolte des fourrages, on utilise une motofaucheuse de 1,20 m de barre de coupe, pour un ou plusieurs prélèvements de 5 m de long par parcelles (soit 6 m²).

La récolte du blé est effectuée à la moissonneuse-batteuse (Massey-Harris, à coupe frontale, 1,80 m), directement. Une modification de l'arrière de la machine permet d'obtenir immédiatement la pesée, par parcelle, de la paille récoltée (fig. C hors-texte).

Pour le maïs, culture dont la récolte est difficilement mécanisable sur de petites parcelles, les épis sont cueillis à la main et stockés dans des sacs à mailles larges, en séchoir, jusqu'au battage.

Main-d'œuvre.

Un ouvrier est employé à temps plein sur l'ensemble des dispositifs, soit 6 ha, dont l'entretien est largement facilité par l'emploi d'herbicides appliqués avec le matériel couramment utilisé dans une exploitation. Pour la réalisation des prélèvements et la récolte, une main-d'œuvre occasionnelle supplémentaire est fournie par l'équipe générale du domaine.

C. — *Données recueillies*

Les essais sur les effets résiduels des cultures fourragères comportent la mise en évidence de manifestations globales résultant de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs dont l'analyse est nécessaire à une meilleure compréhension des résultats obtenus et à une éventuelle généralisation. Les données à recueillir sont donc très nombreuses et sont du domaine de disciplines variées (génétique et physiologie végétale, agronomie, pédologie, biophysique). Un certain nombre d'entre elles sont indispensables à mesurer ou noter).

Données recueillies sur le végétal.

Les mesures et notations effectuées sur les différentes cultures sont indiquées au tableau 32.

Parmi les *notations*, celle qui revêt la plus grande importance concerne la vigueur. Ainsi, sur blé, des mensurations de hauteur réalisées à partir de l'épiaison permettent de mettre en évidence des différences de rapidité de minéralisation de la matière organique du sol. Les autres sont de pratique courante en expérimentation.

L'analyse des *composantes du rendement* apporte une information nécessaire à l'explication du comportement du végétal-test. Elle est pratiquée sur un mètre de ligne, délimité dès la levée de la culture ; les plantes y sont comptées, notamment à la levée et à la récolte.

Au point de vue *rendement*, toutes les comparaisons se font sur la base de la matière sèche, déterminée sur des prélèvements de 500 g de matière humide, passés à l'étuve à 80°C. Ces échantillons sont ensuite broyés et *analysés* pour la détermination des exportations, en particulier en azote (Kjeldahl).

Données recueillies concernant le sol.

Ces données sont :

L'indice S de stabilité de structure des agrégats.

Depuis la mise en place des expériences, chaque année, un certain nombre

TABLEAU 32

Données recueillies à la Station d'Amélioration des Plantes fourragères de Lusignan sur les différentes phases culturales

Données recueillies	Cultures Fourragères	Cultures arables		
		Maïs	Blé, orge, avoine	Pommes de terre
Comptages à la levée				
(3 ou 4 semaines après semis)	× (1)	×	×	×
Notations				
Stades physiologiques	×	×	×	×
Vigueur (note ou mensuration)		×	×	
Attaques de parasites	×	×	×	×
Accidents (verse, échaudage)	×		×	
Dégâts de froid	×		×	
Repousse	×			
Rendements				
Matière verte	×			
Matière sèche	×	× (2)	× (3)	× (4)
Facteurs du rendement				
Nombre de plantes		×	×	
Nombre d'épis		×	×	
Nombre de grains/épi		×	×	
Poids de 1 000 grains		×	×	
Analyses				
Azote	×	×	×	
Potasse et acide phosphorique (5)	×	×	× (Blé)	×

(1) Avec séparation des constituants dans le cas des associations.
(2) Sur grain, paille et rafle séparément.
(3) Sur grain et paille.
(4) Sur tubercules.
(5) Sur l'essai n° 2 seulement.

d'essais est suivi au point de vue de sa stabilité structurale. L'analyse de la stabilité des agrégats est réalisée selon la méthode mise au point au Laboratoire des Sols du C.N.R.A. (Versailles). L'indice S est établi d'après la formule, S. HENIN ET G. MONNIER, 1956) :

$$S = \frac{(A + L)_{max.}}{\frac{A_{ga} + A_{gb} + A_{ge}}{3} - 0{,}9\ S.G.}$$

où $(A + L)_{max.}$ représente le taux le plus élevé d'éléments inférieurs à 20 μ obtenus sans dispersion ; A_{ga}, A_{gb}, A_{ge}, les taux d'agrégats stables respectivement à l'alcool

éthylique, au benzène et sans prétraitement ; S.G. le taux de sable grossier obtenu *sans destruction du calcaire*. Le protocole prévoit que le prélèvement des échantillons sur le terrain est pratiqué, chaque année, entre la récolte du maïs et le labour qui suit pour l'ensemencement du blé. Pour chaque parcelle de 50 m², il est constitué un échantillon moyen de 1 à 2 kg de terre, à partir de 4 prélèvements faits à la bêche, sur la profondeur du labour, les 2 à 3 cm de sol de surface étant éliminés. Ceci est réalisé, dans un dispositif, pour chaque traitement, sur toutes les répétitions. Les échantillons sont séchés à l'air et envoyés ensuite, pour analyse, aux laboratoires compétents.

— *les teneurs du fumier en matière sèche et en azote* (Kjeldahl) ;

— *le rythme de minéralisation de l'azote.*

Il est probable que pour des dispositifs nouveaux, l'étude de cette dernière donnée serait étendue au détriment de celle de la stabilité structurale. Il semble, en effet, d'après les premiers résultats obtenus, que, dans les conditions de Lusignan, l'azote soit la variable explicative prépondérante du rendement.

Données biophysiques.

Fournies par le poste météorologique du Domaine, elles comprennent :

— la température de l'air aux niveaux + 2,00 m, + 0,40 + 0,10 + 0,05 ;

— la température du sol à 0,05 de profondeur ;

— la pluviométrie ;

— l'hygrométrie ;

— l'insolation ;

— la direction et la vitesse du vent.

A partir de ces éléments sont calculés : l'évapotranspiration potentielle (par les formules de TURC et de BOUCHET) et le bilan hydrique.

Formule de TURC : (TURC L., 1961)

$$\text{ETP (mm/mois)} = 0{,}40 \times \frac{t}{t + 15} \quad (I_g + 50)$$

t = température moyenne pendant la période considérée ;

$$\left(I_g = I_{ga}\left(0{,}18 + 0{,}62\ \frac{h}{H}\right)\right)\ (1)$$

Pour février, 0,40 est remplacé par 0,37 si on travaille sur une base mensuelle ; sur une base décadaire, on prend 0,13 (0,12 pour février).

Formule de BOUCHET :

$$\text{ETP} = 0{,}37 \times E_a \times \lambda$$

E_a = évaporation moyenne mesurée au Piche pendant la période considérée.

$\lambda = \dfrac{\text{température moyenne} - \text{température au point de rosée}}{2}$ (il s'agit d'un facteur de correction).

Ces deux catégories de données sur le milieu ont une grande importance car elles expliqueront en partie les rendements obtenus sur les cultures-tests, et notam-

(1) I_{ga} = énergie de la radiation qui atteindrait le sol si l'atmosphère n'existait pas.
h = durée de l'insolation.
H = durée astronomique du jour.

ment, les données climatiques permettent de mieux préciser la part réellement due aux effets résiduels dans le comportement du végétal.

III. — EFFETS RÉSIDUELS DE LA LUZERNE : DÉROULEMENT DES OPÉRATIONS CULTURALES

10- 8-1964. Récolte de la dernière coupe de luzerne

10- 9-1964. Récolte du maïs (plantes entières)
Retournement de la totalité de l'essai à la houe rotative

21- 9-1964. Épandage de scories potassiques 14-14 sur l'ensemble du dispositif (100 kg/ha, respectivement, de P_2O_5 et K_2O)

25. 9. 1964 Labour de l'essai

ESSAI A — ESSAI B

Année agricole 1965

Sous-parcelle maïs

31- 3-1965. Reprise du labour au cultivateur

21- 4-1965. Épandage d'ammonitrate (kg/ha N) :

Traitements			
	1	50	enfouissement au cultivateur
	2	100	
	3	150	
	4	0	

10- 5-1965. semis (*I. N. R. A. 260*)

20-10-1965. Récolte

22-10-1965. Épandage de scories potassiques 14-14 (100 kg/ha de chaque élément)

25-10-1965. Labour de l'ensemble de l'essai

Sous-parcelle blé

hersage et semis (*Capelle*)

épandage d'ammonitrate (kg/ha N) :

Traitements		
	1	200
	2	250
	3	300
	4	0

4- 8-1965. Récolte

16- 8-1965. Déchaumage

Année agricole 1966

Sous-parcelle blé

28-10-1965. Semis (*Capelle*)

Épandage d'ammonitrate (kg/ha N)

Traitements	1	2	3	
23-11-1965.	10	20	30	levée
22- 2-1966.	20	40	60	tallage
20- 4-1966.	20	40	60	montaison
Total	50	100	150	

Sous-parcelle maïs

15- 3-1966. Reprise du labour au cultivateur

26- 4-1966.		Passage de cultivateur puis semis (*I.N.R.A. 260*)
29- 7-1966.	Récolte	
22- 8-1966.	Déchaumage	
29- 9-1966.		Récolte
24-11-1966.	Épandage de scories potassiques	(100 kg/ha de chaque élément)
30-11-1966.	Labour de l'ensemble	de l'essai
	Année agricole 1967	
13- 3-1967.	Reprise du labour au cultivateur	
14- 3-1967.	Semis d'avoine (*Condor*)	
17- 7-1967.	Récolte au stade grain pâteux.	

PLANCHE I

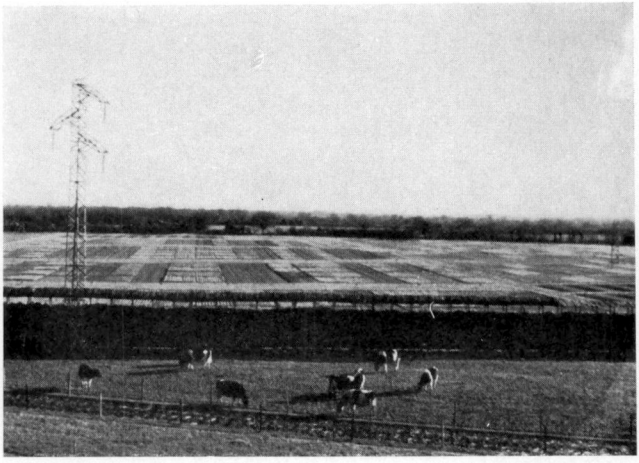


FIG. A. — *Vues d'ensemble de la parcelle d'essais.*

PLANCHE II

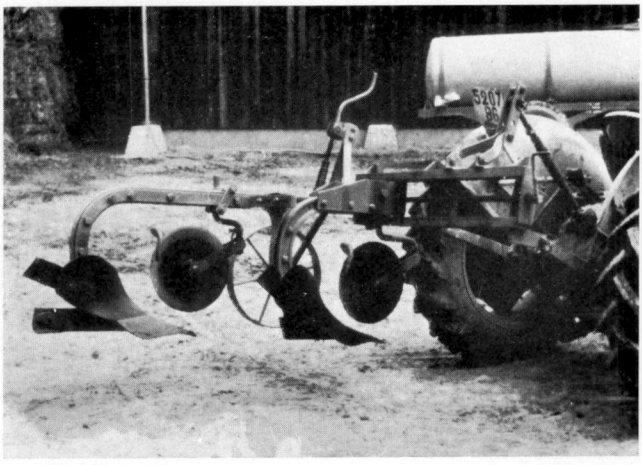


FIG. B. — *Charrue entièrement déportable type « vigneronne ».*
Profil

FIG. C. — *Récolte des céréales à la moissonneuse-batteuse*
Vue arrière de la machine, modifiée en vue de la pesée

Ann. agron., 1969, **20** (4), 435-447.

LES SULFATES « SOLUBLES » DU SOL

Ginette SIMON-SYLVESTRE

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Ce travail apporte des renseignements sur le dosage des sulfates solubles dans les sols et en particulier il précise l'état dans lequel doit se trouver la terre au moment de son analyse. Il est complété par une application de la méthode à l'étude de l'influence des apports de matières organiques sur les variations annuelles des sulfates solubles des sols.

INTRODUCTION

L'évaluation des sulfates du sol utilisables par les plantes (ou sulfates solubles ou sulfates assimilables) a suscité de multiples recherches orientées toutes dans la même direction, c'est-à-dire vers le choix d'un réactif d'extraction tel qu'il existe une corrélation satisfaisante entre la quantité de sulfates ainsi extraite et les conditions d'alimentation en soufre des cultures. Comme pour le dosage de certains autres éléments assimilables (le phosphore par exemple), les réactifs retenus (dont les principaux sont énoncés ci-dessous) sont à peu près aussi nombreux que les chercheurs concernés ; le nombre de publications parues seulement depuis ces dix dernières années en est le témoignage concret :

- eau chaude : SPENCER et FRENEY (1960),
- eau bouillante : SAALBACH *et al.* (1962),
- solutions salines :
  - bicarbonate de sodium 0,5 M, pH 8,5 : KILMER et NEARPASS (1960),
  - chlorure de sodium 1 p. 100 : SAALBACH *et al.* (1962),
  - chlorure de sodium 1 p. 100, après évaporation à sec de la terre humidifiée et séchage dans un courant d'air chaud : WILLIAMS et STEINBERGS (1959),

— chlorure de calcium 1,5 p. 1 000 : WILLIAMS et STEINBERGS (1959) ; KANWAR (1963),
— phosphate de calcium : FOX *et al.* (1964),
— acétate d'ammonium 0,25 N, en milieu acétique : BARDSLEY et LANCASTER (1960) ; SANDFORD et LANCASTER (1962).

Certains agronomes utilisent également les méthodes biologiques, par exemple le test *Aspergillus* : SPENCER et FRENEY (1960) ; NOWOSIELSKI (1961) ; GORSKI (1963) ; NAIK et DAS (1964).

Après plusieurs essais avec quelques-uns de ces réactifs, nous avons finalement adopté le chlorure de calcium à 1,5 p. 1 000. Son utilisation présente certains avantages non négligeables notamment au point de vue rapidité et commodité des analyses : il est possible d'obtenir rapidement des filtrats toujours clairs sur lesquels le dosage des sulfates par turbidimétrie se fait directement. Ce réactif satisfaisant, expérimenté depuis déjà une dizaine d'années, continue d'être employé en Amérique et en Australie. Néanmoins, BARROW (1967), bien qu'il le considère comme un réactif correct d'extraction du soufre assimilable, estime les résultats obtenus un peu faibles, du fait que les sulfates adsorbés ne seraient pas extraits ; c'est pourquoi certains chercheurs australiens préconisent depuis peu d'ajouter au chlorure de calcium du phosphate monocalcique pour pallier cet inconvénient (BARROW, 1967 ; WILLIAMS, 1968). ROBERTS et KOEHLER (1968), eux aussi, considèrent comme satisfaisantes les solutions à base de chlorure pour extraire le soufre assimilable sauf dans quelques cas très spéciaux : sols très riches en gypse ou présentant une forte adsorption des sulfates. Pour notre part, la plupart de nos recherches n'ont pas porté sur ces sols particuliers. On peut alors supposer *a priori* qu'au cas où le chlorure de calcium n'aurait pas extrait la totalité des sulfates utilisables par les plantes, notamment les sulfates adsorbés, tous nos résultats seraient entachés de la même erreur par défaut ; les différences entre les essais subsistent alors et l'interprétation des faits reste valable. Cette méthode nous a déjà permis :

— de suivre les variations annuelles des sulfates solubles dans un sol nu et de les relier à celles de l'azote minéral (SIMON-SYLVESTRE, 1965),
— de mettre en évidence les incidences d'une fumure minérale azotée sur le cycle annuel du soufre (SIMON-SYLVESTRE, 1967 *a*).

C'est également avec cette même méthode qu'ont été obtenus les résultats, mentionnés dans ce travail, sur l'influence de la dessiccation et des apports de matières organiques sur la teneur des sols en sulfates solubles.

DÉTERMINATION DES SULFATES « SOLUBLES » DES SOLS : ÉTUDE CRITIQUE DES CAUSES POSSIBLES DE VARIATIONS

La terre séchée à l'air est agitée pendant une demi-heure avec une solution de chlorure de calcium ($CaCl_2$, 2 H_2O ; 1,5 g par litre) dans le rapport 1/1, selon la technique de WILLIAMS et STEINBERGS (1959).

Sur une partie aliquote du filtrat, les sulfates sont précipités par addition de

chlorure de baryum solide dont les cristaux sont compris entre 0,5 et 0,315 mm [1]. Une solution de gomme arabique à 0,25 p. 100 (2 ml par fiole de 25 ml) maintient le précipité en suspension. Après une agitation d'une minute exactement, les lectures sont faites rapidement au spectrophotomètre, à 460 mμ, et comparées avec celles d'une gamme étalon préparée dans les mêmes conditions.

1. *Variations dues à la technique de dosage*

Avant d'adopter cette méthode, il fallait s'assurer en premier lieu que le sulfate de baryum précipitait toujours de la même façon, compte tenu de certaines précautions déjà énoncées : calibrage des cristaux de $BaCl_2$, addition de gomme arabique, temps d'agitation constant, lecture au spectrophotomètre dans un intervalle de temps défini.

— La première vérification a été faite sur une solution pure de sulfate de potassium. Trois gammes identiques, étalées entre 0 et 10 μg de S par ml sont préparées en même temps et dans les mêmes conditions. Les différentes lectures au spectrophotomètre indiquent une bonne reproductibilité des résultats :

Lectures

	Gamm		
	1	2	3
2 μg S/ml	5,5	5,5	5,5
4 —	25	27,5	25
6 —	43	42,5	44,5
8 —	62	61,0	60,5
10 —	79	80,5	79,5

— Une deuxième vérification a été réalisée sur une solution obtenue après agitation du sol frais en présence de chlorure de calcium. Le soufre a été dosé cinq fois sur le même filtrat. Les résultats sont exprimés en p.p.m. S pour le sol séché à 105°.

1er sol	2e sol
11,3 p.p.m. S	16,6 p.p.m. S
11,3	17,4
11,4	17,3
11,6	17,0
12,0	17,0
moyenne = 11,52	moyenne = 17,06
écart-type = 0,295	écart-type = 0,313
coefficient de variation = 2,56 p. 100	coefficient de variation = 1,70 p. 100

[1] L'utilisation de chlorure de baryum calibré permet l'obtention d'un précipité de sulfate de baryum à grains iso-dimensionnels.

En suivant les conditions précitées, la précipitation du sulfate de baryum donne des résultats très satisfaisants.

Il faut signaler, d'autre part, qu'au cours de plusieurs essais d'extractions successives, nous avons pu constater que la première extraction fait passer en solution la quasi-totalité des sulfates solubles présents dans le sol.

2. *Variations dues au sol*

Il s'agissait, dans cette partie, de définir l'importance des variations locales des sulfates solubles dans le sol. Différents essais ont été entrepris à ce sujet à La Minière (près de Versailles) et à Versailles, au mois de juillet, c'est-à-dire à une époque de l'année où, en principe, la teneur des sols en sulfates solubles est plus élevée, ce qui *a priori* permet de mieux apprécier les variations si elles existent. L'expérience portait sur une parcelle carrée, de 10 m de côté, apparemment homogène par sa nature et son passé cultural, partagée en 100 carrés de 1 m de côté. Les prélèvements de sol ont été réalisés dans un certain nombre de petits carrés tirés au sort.

— Dans un premier essai, pour chacun des sols désignés ci-dessus, la terre d'une même parcelle prélevée par cinq sondages a été bien mélangée. Ensuite, cinq échantillons frais de ce sol mélangé ont été analysés séparément.

échantillon	1re parcelle	2e parcelle
1er.....	13,8 p.p.m. S (sol séché à 105°)	8,2 p.p.m. S (sol séché à 105°)
2e	11,9	7,4
3e	12,6	8,2
4e	11,2	8,6
5e	11,2	8,6
	moyenne = 12,15	moyenne = 8,20
	écart-type = 1,094	écart-type = 0,49
	coefficient de variation = 9,0 p. 100	coefficient de variation = 5,97 p. 100

A la variation due à la méthode de dosage, s'ajoutent, pour ces coefficients de variation, une variation provenant de l'extraction elle-même et une autre de la non-parfaite homogénéité du mélange de terre.

— Dans un second essai, cinq sondages ont été faits dans 15 petits carrés. Les analyses ont porté sur 5 échantillons moyens frais comprenant chacun la terre bien mélangée de 3 parcelles donc de 15 sondages :

à La Minière	à Versailles (moins homogène au départ)
14,9 p.p.m. S (sol séché à 105°)	11,9 p.p.m. S (sol séché à 105°)
15,6	12,6
11,55	15,0
12,85	11,9
13,05	10,9
moyenne = 13,6	moyenne = 12,45
écart-type = 1,63	écart-type = 1,54
coefficient de variation = 11,98 p. 100	coefficient de variation = 12,37 p. 100

— Les cinq sondages pour un même petit carré à La Minière ont été analysés séparément, à l'état frais, dans un troisième essai :

13,10 - 12,55 - 13,00 - 11,80 et 14,50 p.p.m. S (sol séché à 105°)
Moyenne 13,0
Écart-type..... 0,988
Coefficient de variation ..... 7,60 p. 100.

La comparaison des différents coefficients de variation permet de constater que les variations locales sont peu différentes de celles trouvées précédemment pour les cinq échantillons d'un même prélèvement. Ces variations locales sont dues vraisemblablement à des différences dans l'état de la terre au moment du prélèvement (tassement, humidité...) entraînant une activité biologique différente. Elles peuvent atteindre 5 à 6 kilogrammes de soufre par hectare. HÉBERT (1968) a observé des variations relatives analogues en ce qui concerne l'azote minéral.

3. *Variations dues à la dessiccation du sol*

Un dernier point restait encore à préciser avant d'utiliser cette méthode pour des recherches. Il fallait vérifier si le fait de sécher la terre avant de l'analyser n'amenait pas une modification de sa teneur en sulfates solubles. Le problème du séchage des sols a été jusqu'à maintenant beaucoup moins étudié pour le soufre que pour l'azote. Seuls, deux auteurs australiens (BARROW, 1961 ; WILLIAMS, 1966) ont signalé une augmentation possible de la teneur de la terre en sulfates assimilables après une dessiccation. C'est pourquoi la première application de la méthode a consisté en une étude de l'influence de l'état des échantillons de terre sur leur teneur en sulfates solubles.

Les échantillons analysés proviennent des parcelles témoin d'un champ d'expériences utilisé par CHABANNES et BARBIER pour leurs études sur l'évolution de l'azote et situé à « La Minière », ferme expérimentale près de Versailles. Il s'agit d'un limon des plateaux, profond, battant, maintenu sans cultures depuis 1964, mais recevant des façons culturales normales.

Les analyses ont été réalisées soit sur des échantillons prélevés au cours de l'année 1965 et séchés ou à l'air libre, ou au four infrarouge, soit sur des échantillons de l'année 1967, frais (l'extraction est effectuée à peine une heure après le prélèvement de la terre conservée en sac plastique), ou séchés à l'air libre.

La méthode d'extraction des sulfates solubles a été légèrement modifiée pour les échantillons frais : nous avons utilisé un réactif plus concentré (1,5 g $CaCl_2$/800 ml d'eau), un volume moindre de réactif (40 ml) et un poids de terre supérieur (60 g), de façon à nous rapprocher le plus possible des conditions réalisées dans l'analyse des échantillons secs (50 g de terre et 50 ml $CaCl_2$ 1,5 p. 1 000). Il est évidemment impossible de fixer une méthode qui puisse convenir pour tous les taux d'humidité que peut avoir un sol au cours de l'année. Nous l'avons établie pour un taux de 20 p. 100, taux voisin de ceux trouvés dans le sol au printemps et en automne.

Sur la figure 1, sont représentées les variations au cours de l'année 1965 des sulfates solubles déterminées dans des échantillons séchés soit à l'air, soit au four infrarouge. Les chiffres indiquent la somme des quantités dosées dans le sol et dans le sous-sol et correspondent à la moyenne des résultats obtenus pour les cinq parcelles

témoin. C'est sur la base de 3 000 tonnes de terre pour le sol (prélevé entre 0 et 25 cm) et 2 100 tonnes pour le sous-sol (compris entre 25 et 40 cm) que les résultats ont été transposés à l'hectare. Les variations des sulfates solubles au cours de l'année 1967, pour des échantillons frais ou séchés à l'air, apparaissent sur la figure 2. Il faut préciser que les différents points du diagramme de la terre fraîche ont été calculés pour la terre séchée à 105°, ce qui surestime très légèrement leurs valeurs par rapport à celles de la terre séchée à l'air qui contient encore environ 1,5 à 2 p. 100 d'eau d'hygroscopicité.

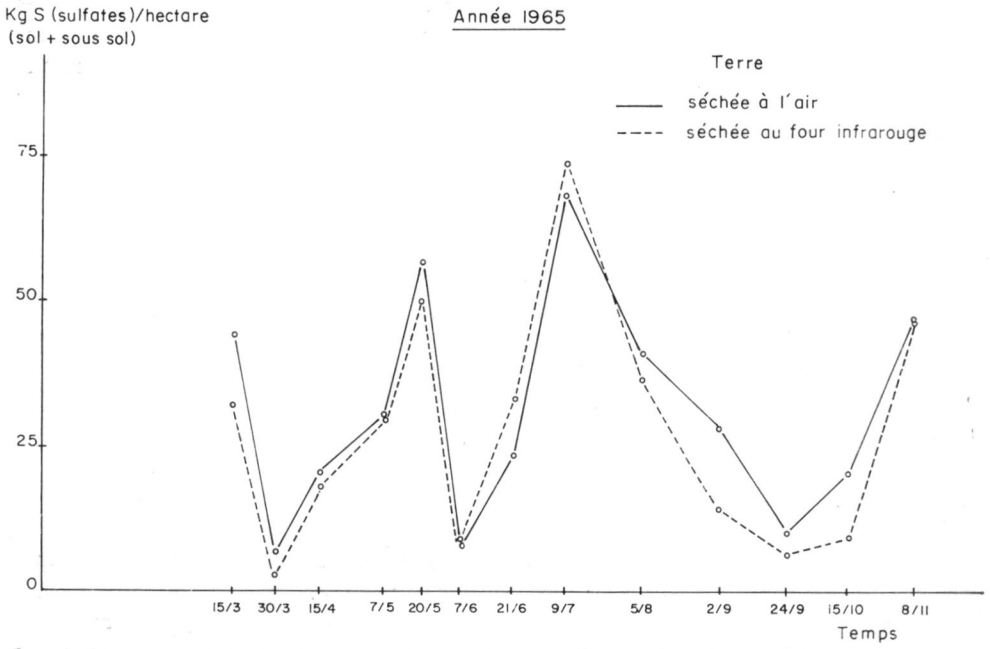


FIG. 1. — *Influence du mode de séchage des échantillons sur le cycle annuel du soufre.*

Conformément à nos observations antérieures, nous retrouvons pour chaque année la même tendance générale des diagrammes, à savoir une minéralisation printanière et estivale du soufre organique avec un maximum en juillet-août suivi d'une réorganisation automnale du soufre minéral. Il est bien évident qu'examinés dans le détail les diagrammes présentent d'une année à l'autre de légères différences par suite des conditions climatiques spéciales de chaque année (en particulier répartition et intensité des pluies...) ainsi que nous l'avons déjà précisé (SIMON-SYLVESTRE, 1967 *b*), les diverses dents de scie, d'importance variable, se situant à des époques différentes.

Il est intéressant d'observer, compte tenu des variations locales et mis à part quelques points légèrement aberrants, la bonne correspondance entre eux des diagrammes de l'année 1965 ainsi que celle existant pour ceux de 1967 : l'état de la terre ne semble pas jouer sur sa teneur en sulfates solubles, tout au moins pour le sol expérimenté. Cela correspond d'ailleurs aux derniers résultats de WILLIAMS publiés tout récemment (1968). Qu'elle soit fraîche, séchée à l'air ou séchée au four, la terre renferme pratiquement toujours la même quantité de sulfates solubles (rapportée à

la terre sèche), notamment au maximum de minéralisation. Si nous comparons les pourcentages de minéralisation de l'azote et du soufre, nous constatons que les différences observées pour la terre séchée à l'air (SIMON-SYLVESTRE, 1967 *a*) sont encore plus accusées pour la terre fraîche, du fait que le séchage ne modifie pas le taux des sulfates alors qu'il augmente celui de l'azote minéral et accroît ainsi le pourcentage d'azote minéralisé.

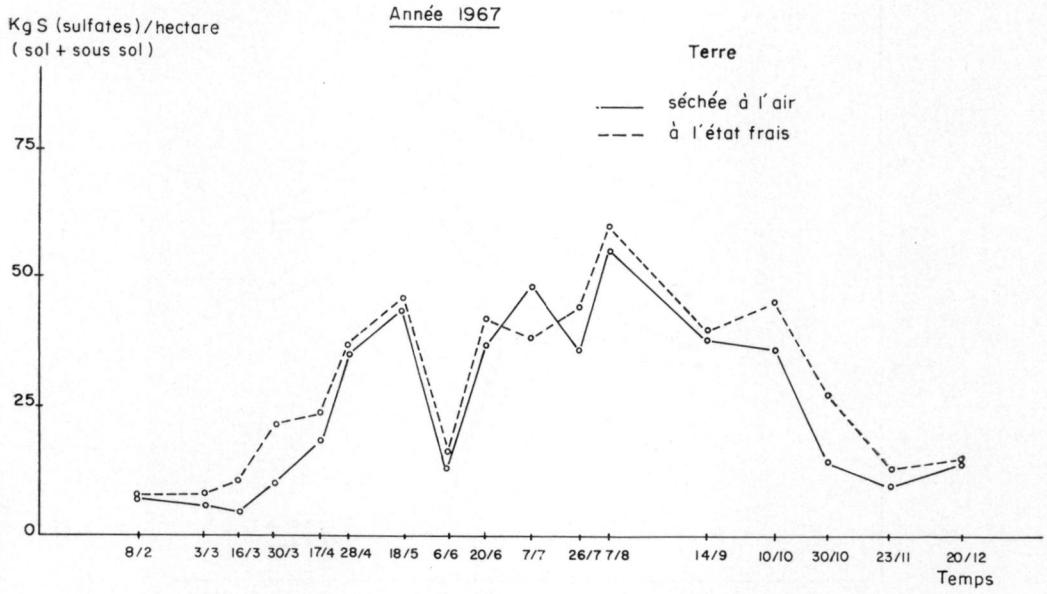


FIG. 2. — *Influence du séchage des échantillons de terre sur le cycle annuel du soufre.*

Toutefois, avant de conclure sur l'influence exercée par le séchage de la terre sur sa teneur en sulfates solubles, les essais ont été repris en 1968 sur des sols différents, travaillés, mais maintenus sans cultures. Les analyses ont porté sur des échantillons de sol frais et sur des échantillons homologues séchés à l'air. Ces échantillons proviennent d'une part, d'un limon des plateaux de Versailles (expérience d'enfouissement de matière organique commencée en 1945 : parcelles témoin sans matière organique et parcelles enrichies en fumier tous les ans, 30 kg pour 20 m²) et d'autre part d'un sol argilo-limono-calcaire de Grignon.

L'observation de la figure 3, donnant les variations des sulfates solubles exprimées en p.p.m. S, entre le 15 mai et le 29 août, permet de constater une bonne correspondance des diagrammes, principalement pour Grignon. Pour les parcelles « témoin » et les parcelles « fumier », le séchage de la terre provoque cependant une augmentation légère de la teneur de la terre en sulfates solubles. Cet accroissement atteint dans certains cas 20 p. 100, tandis que les variations locales déterminées précédemment, oscillaient entre 10 et 15 p. 100.

Il ressort de cette étude que l'effet du séchage de la terre sur sa teneur en sulfates solubles est faible, comparativement aux variations observées pour l'azote. Il est

donc possible de stocker temporairement les échantillons séchés à l'air libre avant de les analyser ; ce qui simplifie le travail et évite de doser les sulfates solubles immédiatement après le prélèvement du sol.

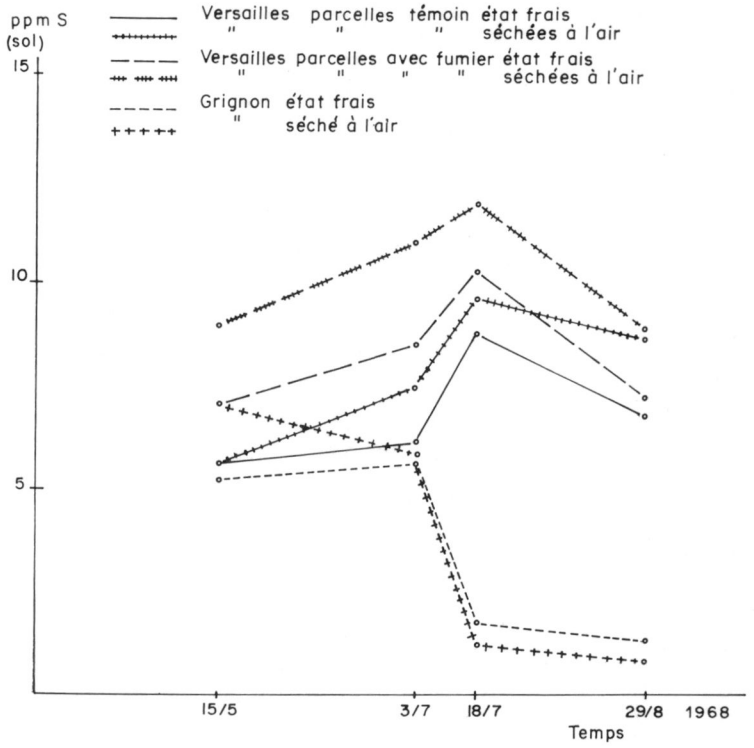


FIG. 3. — *Influence du séchage des échantillons de terre sur l'évolution annuelle des sulfates solubles dans différents sols.*

INFLUENCE D'APPORTS DE MATIÈRES ORGANIQUES SUR LES VARIATIONS ANNUELLES DES SULFATES SOLUBLES DU SOL

L'apport fréquent de fumures organiques, à forte dose, peut conduire, en l'absence de cultures, à un enrichissement du sol en soufre total (SIMON-SYLVESTRE, 1964). On peut penser que, dans les mêmes conditions, une application répétée et prolongée de certaines matières organiques entraîne également une modification du cycle annuel du soufre. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons utilisé un essai d'enfouissement de matières organiques commencé en 1945 à Versailles et comprenant douze parcelles nues de 20 m² dont onze seulement servent pour cette étude :

— deux parcelles témoin (nos 1 et 7)
— trois parcelles recevant de la paille
  12 kg tous les ans (nos 2 et 10)
  36 kg tous les 3 ans (nos 5)

— trois parcelles recevant du fumier
  30 kg tous les ans (nos 3 et 11)
  90 kg tous les ans (no 6)
— deux parcelles recevant du foin de luzerne
  13 kg tous les ans (no 4)
  30 kg tous les 3 ans (no 9)
— une parcelle recevant de la tourbe (no 8).

Des échantillons de sols et de sous-sols ont été prélevés dans ces différentes parcelles au cours de l'année 1967, toutes les 3 à 4 semaines. Étant donné la longue durée de l'expérience, il est possible, pour faciliter l'interprétation des faits, de calculer, pour chaque traitement, la moyenne des différentes parcelles en les considérant comme identiques, que l'apport de matières organiques soit fait chaque année ou tous les trois ans.

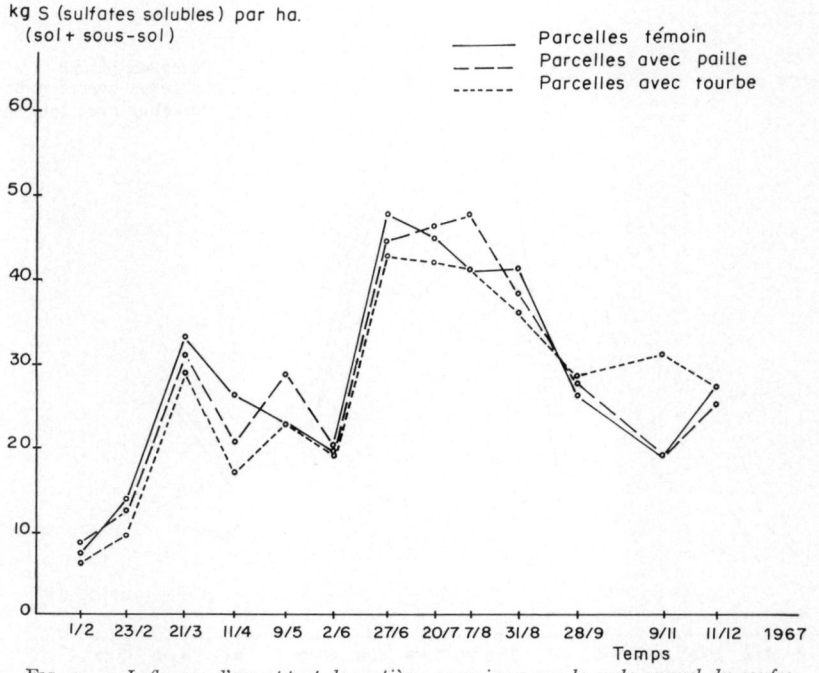


FIG. 4. — *Influence d'un apport de matières organiques sur le cycle annuel du soufre.*

L'examen des diagrammes du cycle du soufre (fig. 4 et 5) correspondant à ces différentes parcelles conduit aux conclusions suivantes :

— Tous les diagrammes présentent la même allure générale, mais deux se détachent nettement au moment du maximum de minéralisation, qui se produit de fin juin à mi-août : les diagrammes des parcelles « fumier » et ceux des parcelles « foin de luzerne ». Le cycle du soufre dans les parcelles « paille » et « tourbe » suit, par contre, fidèlement celui des parcelles « témoin ». Au maximum de minéralisation, les analyses indiquent respectivement 42, 47 et 47 kg S minéral par hectare dans ces

dernières parcelles tandis que les parcelles « foin de luzerne » et les parcelles « fumier » contiennent respectivement 57 et 70 kg de S minéral.

— Les enfouissements répétés de fumier et de foin entraînent donc une amplitude plus importante dans les variations du cycle du soufre. En ce qui concerne le fumier, il existe un effet résiduel très net puisque, chaque année, il n'est apporté que 15 t/ha soit approximativement 7,5 kg S tandis que l'écart avec le témoin au maximum de minéralisation atteint une vingtaine de kilogrammes de S minéral. Pour le foin de luzerne, l'effet résiduel est beaucoup moins net. En effet, tous les ans, le foin enfoui apporte une grosse quantité de soufre (6,5 t/ha de foin soit 15 à 20 kg S), si bien que la différence trouvée par rapport au témoin provient peut-être uniquement de l'apport précédent, d'autant plus que le foin se décompose très vite et ne laisse guère plus de résidus humiques que la paille (tabl. 1).

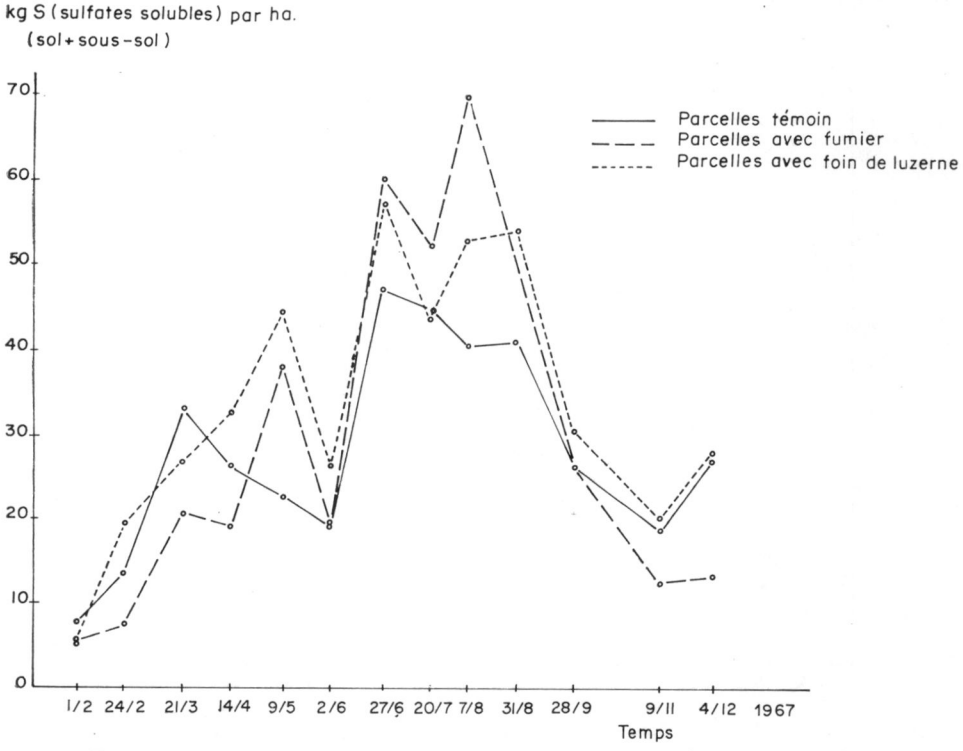


FIG. 5. — *Influence d'un apport de matières organiques sur le cycle annuel du soufre.*

Il faut également attirer l'attention sur le fait que les effets résiduels du fumier et du foin apparaissent surtout à l'époque où la minéralisation est maximum. Par contre, au cours de la période de minéralisation minimum, située en hiver et au début du printemps, tous les diagrammes se rapprochent du diagramme des parcelles « témoin » : les apports antérieurs de matières organiques ne semblent donc pas modifier le taux des sulfates solubles du sol à cette époque de l'année où éventuellement des cultures d'hiver peuvent avoir déjà des besoins en soufre non négligeables.

Nous retrouvons, dans les parcelles « témoin » de cette expérience, l'évolution

parallèle, au cours du temps, des trois éléments, carbone, azote, soufre avec un appauvrissement un peu plus rapide pour le soufre (tabl. 1) (cf. SIMON-SYLVESTRE, 1964). Pour les parcelles enrichies en matières organiques, les résultats diffèrent toutefois de ceux obtenus précédemment pour des apports plus importants de matières organiques : il n'y a pas enrichissement mais seulement ralentissement de l'appauvrissement de la teneur des sols en carbone, azote et soufre totaux : l'effet

TABLEAU I

Évolution du carbone, de l'azote et du soufre totaux des sols

	Carbone p. 1 000		Azote p. 1 000		Soufre p. 1 000	
	1947	1966	1947	1966	1947	1966
Parcelle témoin (1)	9,32	7,30	0,93	0,73	0,142	0,089
Parcelle témoin (7)	8,25	7,07	0,84	0,69	0,1165	0,096
Moyenne	*8,785*	*7,185*	*0,885*	*0,71*	*0,129*	*0,0925*
P. 100 restant.....		81,8		80,2		71,7
+ paille (2)	9,54	8,30	0,87	0,74	0,091	0,076
+ paille (5)	8,53	7,71	0,85	0,71	0,116	0,097
+ paille (10)	9,80	8,09	0,89	0,81	0,136	0,104
Moyenne	*9,29*	*8,03*	*0,87*	*0,75*	*0,114*	*0,0925*
P. 100 restant.....		86,5		86,55		81,1
+ fumier (3)	10,55	9,46	0,89	0,77	0,133	0,1205
+ fumier (6)	9,52	8,58	0,84	0,76	0,123	0,1175
+ fumier (11)	9,87	9,70	0,82	0,74	0,113	0,1055
Moyenne	*9,98*	*9,24*	*0,85*	*0,756*	*0,123*	*0,115*
P. 100 restant.....		92,6		89,0		93,5
+ foin de luzerne (4) .	9,62	8,19	0,93	0,77	0,116	0,072
+ foin de luzerne (9) .	8,93	8,24	0,85	0,760	0,122	0,0955
Moyenne	*9,275*	*8,215*	*0,89*	*0,765*	*0,119*	*0,084*
P. 100 restant.....		88,6		86,0		70,6
+ tourbe (8).....	10,47	14,83	0,85	0,92	0,123	0,155
P. 100 restant.....		141,6		108,0		126

est surtout net pour le fumier qui laisse plus de résidus humiques que la paille et le foin de luzerne. L'apport continuel de paille, tout en ralentissant les pertes en C, N et S, ne modifie pas le cycle annuel du soufre. Il en est de même pour la tourbe, bien que son application conduise à un enrichissement du sol en C, N et S, mais ce soufre organique, tout comme l'azote, doit être inerte et n'intervient pas dans le cycle annuel du soufre. Il est regrettable que des échantillons des diverses matières organiques, apportées depuis le début de l'expérience, n'aient pas été conservés : des bilans d'azote et de soufre auraient pu alors être effectués.

CONCLUSIONS

Au cours du présent travail, il a été procédé d'abord à une analyse critique de la méthode de détermination des sulfates solubles des sols, extraits par une solution de chlorure de calcium à 1,5 p. 1000. L'utilisation de cette méthode a permis ensuite de montrer que le séchage de la terre à l'air ou par la chaleur ne modifie que très peu sa teneur en sulfates solubles. Il en résulte que, au point de vue pratique, il est possible de stocker temporairement des échantillons dans le cas où de nombreux prélèvements ont été réalisés en absence de personnel immédiatement disponible.

Enfin, l'application de cette méthode à l'étude des variations annuelles du cycle du soufre dans les sols non cultivés recevant des apports répétés et prolongés de matières organiques a permis de montrer que le foin de luzerne et surtout le fumier, entraînent une augmentation des sulfates solubles à l'époque (juillet-août) où la minéralisation du soufre organique est maximum. Ces apports organiques pourraient ainsi intervenir favorablement en été dans l'approvisionnement des cultures en soufre, tandis que leurs effets résiduels risquent d'être inexistants à la fin de la période hivernale.

Reçu pour publication en juin 1969.

SUMMARY

SOLUBLE-SULPHATE CONTENTS OF SOILS

Air- or heat-drying affects but little the content of soluble sulphates in soils. Under certain conditions, addition of oganic matter may affect the extent of the yearly variations of the sulphur cycle.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE « LÖSLICHEN SULFATE » DES BODENS

Die Luft oder Wärmetrocknung beeinflusst nicht oder nur sehr wenig den Gehalt der Böden an löslichen Sulfaten. Unter bestimmten Bedingungen können Zugaben an organischen Matterien zu Amplituden-Aenderungen der jährlichen Variationen des Schwefelkreislaufes führen.

РЕЗЮМЕ

« *Растворимые сульфаты* » *почв.*

Ж. СИМОН-СИЛЬВЕСТР.

Высушивание на воздухе, или при помощи тепла не влияет, или оказывает очень слабое влияние на содержание растворимых сульфатов в почве. Внесение органического, вещества может, напротив, в определенных условиях вызвать изменения размеров годичных колебаний круговорота серы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARDSLEY C. E., LANCASTER J. D., 1960. Determination of reserve sulfur and soluble sulfates in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 265-268.

BARROW N. J., 1961. Studies on mineralisation of sulphur from soil organic matter. *Austral. J. agric. Res.*, **12**, 306-319.

BARROW N. J., 1967. Studies on extraction and on a availability to plants of adsorbed plus soluble sulfate. *Soil Sci.*, **104**, 242-249.

FOX R. L., OLSON R. A., RHOADES H. F., 1964. Evaluating the sulfur status of soils by plant and soil tests. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **28**, 243-246.

GORSKI M., 1963. Studies on determination of available sulfur with *Aspergillus niger*. *Roczn. Glebozn*, **13**, 155-164.

HÉBERT J., 1968. Communication orale.

KANWAR J. S. 1963. Investigations on sulphur in soils. *Indian J. agric. Sci.*, **33**, 196-204.

KILMER V. J., NEARPASS D. C., 1960. The determination of available sulfur in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 337-340.

NAIK M. S., DAS N. D., 1964. Available sulphur status of indian soils by the *Aspergillus niger* method. *Journ. ind. Soc. Soil Sci.*, **12**, 151-155.

NOWOSIELSKI O., 1961. Available sulphur in Polish soils : available sulphur content in relation to soil type and fertilization. *Roczn. Nauk. Rolnicz.* sér. A, **84**, 35-62.

ROBERTS S., KOEHLER F. E., 1968. Extractable and plant available sulfur in representative soils of Washington. *Soil Sci.*, **108**, 53-59.

SAALBACH E., KESSEN G., JUDEL G. K., 1962. Untersuchungen über die Bestimmung des Gehaltes an pflanzenverfügbarem Schwefel im Boden. *Landwirtsch. Forsch.*, **15**, 6-15.

SANDFORD J. A., LANCASTER J. D., 1962. Biological and chemical evaluation of the readily available sulfur status of Mississippi Soils. *Soil Sci. Soc. Amer Proc.*, **26**, 63-65.

SIMON-SYLVESTRE G., 1964. Évolution comparée du soufre, de l'azote et du carbone pendant 30 ans dans un sol maintenu sans végétation. *Ve Symposium international Agrochimica*, Palerme, 163-169.

SIMON-SYLVESTRE G., 1965. Évolution annuelle du soufre dans le sol, comparée à celle de l'azote. *C. R. Acad. Agric.*, 426-431.

SIMON-SYLVESTRE G., 1967 *a*. Nouvelles observations sur le cycle annuel du soufre et de l'azote dans le sol. *C. R. Acad. Agric.*, 90-96.

SIMON-SYLVESTRE G., 1967 *b*. Observations sur le cycle annuel du soufre dans un sol sous climat modérément pluvieux. *Agrochimica*, **12**, 60-68.

SPENCER K., FRENEY J. R., 1960. A comparison of several procedures for estimating the sulphur status of soils. *Austral. J. agric. Res.*, **2**, 948-959.

WILLIAMS C. H., 1966. Some factors affecting the mineralization of organic sulphur in soils. *Plant and Soil*, **26**, 205-223.

WILLIAMS C. H., 1968. Seasonal fluctuations in mineral sulphur under subterranean clover pasture in southern New South Wales. *Austral. J. Soil. Res.*, **6**, 131-139.

WILLIAMS C. H., STEINBERGS A., 1959. Soil sulphur fractions as chemical indices of available sulphur in some australian soils. *Austral. J. agric. Res.*, **10**, 340-352.

Ann. agron., 1969, **20** (4), 449-451.

CHRONIQUE DES LIVRES

GAUTIER J.-A. et MALANGEAU P., éd. — MISES AU POINT DE CHIMIE ANALYTIQUE, ORGANIQUE, PHARMACEUTIQUE ET BROMATOLOGIQUE. — 18e série, Paris, Masson, 171 p., 1969.

Cette 18e série des Mises au point de Chimie analytique organique-pharmaceutique et bromatologique contient les travaux suivants :

P. BRUN et F. PELLERIN : L'analyse des plastiques. — Première partie : généralités, définitions, structure, classification.

P. DEVILLERS : La réaction de Maillard. Aspect chimique et aspect technologique en sucrerie.

J.-L. KIGER : Problèmes posés par la diagnose rapide individuelle des médicaments et de leurs matières premières dans l'industrie pharmaceutique et en officine.

M. PLAT : Analyse systématique des spectres de résonance magnétique nucléaire.

R. ROSSET : Les applications des méthodes polarographiques récentes à la chimie analytique organique.

E. A. M. F. DAHMEN : Analyse chimique continue et automatique.

WHITTINGTON (W. J.), ed. — ROOT GROWTH. — Proceedings of the 15th Easter School in agricultural Science, University of Nottingham, 1968. Londres, Butterworths, 1969, 462 p.

Les racines des plantes ont été jusqu'ici moins étudiées que les autres organes de celles-ci, car elles sont rarement d'une utilisation directe par l'Homme, et elles sont difficiles à étudier dans leur état naturel. Cependant la racine est essentielle pour la croissance de la plante, en ce qui concerne l'approvisionnement en eau, en éléments nutritifs et en substances de croissance.

Grâce au développement de nouvelles techniques, l'étude des systèmes racinaires fait actuellement l'objet d'un intérêt accru.

Le but de ce Symposium, tenu à l'Université de Nottingham, a été de donner un aperçu des divers sujets en rapport avec la croissance des racines. Il contient les articles suivants :

1. *Structure et physiologie générale des racines.*

F. A. L. CLOWES : Aspects anatomiques de la structure et développement.

H. E. STREET : Facteurs influençant la croissance et l'activité des méristèmes dans les racines.

C. E. HESS : Facteurs internes et externes responsables de la croissance des racines.

H. RUFELT : Réactions géo- et hydrotropiques des racines.

Y. VAADIA et C. ITAI : Interrelations de croissance en rapport avec la distribution des substances de croissance.

J. F. SUTCLIFFE et R. SEXTON : La différentiation cellulaire dans la racine en rapport avec son rôle physiologique.

2. *Le fonctionnelement de la racine en réponse aux conditions de milieu.*

A. KLUTE et D. B. PETERS : Absorption d'eau et croissance racinaire.

C. HACKETT : Aspects quantitatifs de la croissance des systèmes racinaires des céréales.

R. S. RUSSELL et P. NEWBOULD : L'absorption des éléments nutritifs dans les systèmes racinaires.

G. D. BOWEN et A. D. ROVIRA : L'influence des micro-organismes sur la croissance et le métabolisme des racines.

J. GREENWOOD : Influence de la distribution d'oxygène dans le sol sur la croissance des plantes.

R. BROUWER et C. T. de WIT : Un modèle de croissance de plante, tenant spécialement compte de la croissance des racines et de ses conséquences.

3. *Le milieu et la croissance des racines.*

D. K. Das Gupta : Influence de la décapitation sur la croissance de la racine de betterave sucrière.

E. L. Greacen et *coll.* : La mécanique de la croissance des racines dans les sols ; conséquences en ce qui concerne la répartition des racines.

T. E. Williams : Activité des racines des prairies de graminées pérennes.

W. S. Rogers et G. C. Head : Facteurs affectant la répartition et la croissance des racines des espèces ligneuses pérennes.

A. Troughton et W. J. Whittington : Variation génétique dans les systèmes racinaires.

B. W. Eavis et D. Payne : Conditions physiques du sol et croissance des racines.

H. C. de Roo : Travail du sol et croissance des racines.

Le volume est complété par une description détaillée des laboratoires d'observation des racines d'East Malling et par les comptes rendus des démonstrations réalisées lors du Symposium.

Maxwell (J. A.). — Rock and Mineral Analysis. — New York, London, Intersciences Publishers, série « Chemical analysis », 1968, 584 p.

Parmi les livres publiés récemment en langue anglaise sur l'analyse des minéraux et des roches, ce volume apparaît comme étant le plus complet.

Son grand intérêt réside dans le fait que l'auteur essaie de réaliser une synthèse de l'évolution des méthodes analytiques durant les vingt dernières années, en reliant en particulier les méthodes classiques (gravimétriques) et les méthodes les plus récentes (spectroscopiques ou spectrographiques).

Le plan comprend quatre parties :

— une partie consacrée à des généralités telles que l'échantillonnage, la précision, l'équipement du laboratoire ou les méthodes de mise en solution,

— une partie est une revue critique des méthodes de détermination de quelques éléments (une trentaine environ) et cite les principes d'analyses et les problèmes posés par les méthodes, qu'elles soient gravimétrique, titrimétrique, colorimétrique,

— une troisième partie où l'auteur a sélectionné et développé certains processus classiques d'analyse totale (pour silicates et carbonates) et en particulier la méthode rapide de Shapiro et Brannock,

— une dernière partie, peut-être d'ailleurs trop brève, est consacrée à deux méthodes plus récentes : la spectrographie d'émission X (par fluorescence) et l'absorption atomique dont l'emploi est en train de révolutionner le domaine de l'analyse des roches.

Il s'agit donc là d'un ouvrage réalisant une mise au point récente, avec de nombreuses références bibliographiques, qui sera très utile aux chimistes devant faire des analyses totales de roches ou de minéraux.

Bonnier (C.) et Brakel (J.). — Lutte biologique contre la faim. Légumineuses. Rhizobium. — Gembloux (Belgique), ed. J. Duculot, 1969, 148 p.

Comme l'indique J. Pochon dans sa préface « C'est à la fois une très vaste synthèse, une étude scientifique profondément fouillée et une excellente technologie qui sont ici présentées...

... Vaste synthèse, car sont évoquées, comme contexte général, les questions de productivité en rapport avec la nutrition végétale, celles du cycle général de l'azote dans la biosphère et plus particulièrement dans le sol, celles enfin d'écologie dans différents biotopes et, plus spécialement, dans les écosystèmes tropicaux.

Étude scientifique profondément fouillée car l'on trouve ici une excellente mise au point de recherche fondamentale sur le *Rhizobium* lui-même et sur la symbiose sous ses ultiples aspects : nodulation, spécificité d'hôte, efficacité, compétition, antagonisme, action des phages, mécanisme biochimique de la fixation.

Excellente technologie car, dans la partie consacrée à la sélection des souches, à leur conservation, à leur culture, aux pratiques de bactérisation, au contrôle des produits, on sent, à chaque ligne, les chercheurs qui ont méthodiquement travaillé pendant des années et pour lesquels aucun détail n'est superflu pour obtenir les meilleurs résultats.

Cet ouvrage vient donc au moment opportun et il rendra de grands services sur des plans très divers, d'autant plus qu'une bibliographie soignée, des listes de manuels à consulter, des index d'auteurs et de matières faciliteront son utilisation, même à des non-spécialistes. »

COLLOQUIUM ON FOREST FERTILIZATION. — Proceedings of the 5th Colloquium of the International Potash Institute, Jyväskylä (Finland), 1967. — Berne, Institut international de la Potasse, 1969, 379 p.

Quarante spécialistes des questions forestières présentent, dans ce volume, les aspects les plus modernes de la fertilisation des forêts, et étudient plus particulièrement les points suivants :

— Principes et perspectives de la fertilisation des forêts,
— facteurs de croissance et détermination des besoins de fumure des arbres forestiers,
— la fumure des jeunes plantations,
— méthodes d'application des engrais en forêt,
— résultats de la fertilisation des forêts,
— état actuel de la fumure des forêts dans les principaux pays forestiers d'Europe, aux États-Unis et au Japon,
— aspects qualitatifs et économiques de la fumure des forêts,
— influence de la fumure sur les maladies et les parasites des arbres forestiers.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques. etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviation ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes : *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... . — *le nom de l'établissement* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant sous une forme concise tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *Références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals,* ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in ».

La mention de « communication personnelle » ou « données non publiées » etc, doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffre arabe visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HENIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles (France). On demande deux exemplaires.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 20 1969 NUMÉRO 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

Ann. agron., 1969, **20** (5), 457-474.

RÉACTIONS D'ÉCHANGE ET PRINCIPAUX FACTEURS DE L'ALIMENTATION POTASSIQUE DES PLANTES, DANS DEUX SOLS DE TEXTURES DIFFÉRENTES

R. BLANCHET et M. BOSC
avec la collaboration technique de N. GELFI

Station d'Agronomie et d'Œnologie
67, Boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Le rôle des réactions d'échange intervenant dans les équilibres d'adsorption, la diffusion, et le transport des ions K^+ par les mouvements de phase liquide, est établi et discuté, ainsi que ses conséquences sur l'alimentation potassique des plantes, dans deux sols de textures et de capacités d'échange de cations différentes. La capacité d'échange intervient dans ces divers processus sous de nombreux aspects, qui sont discutés.

INTRODUCTION

Au cours de travaux antérieurs, nous avons montré à diverses reprises que l'alimentation potassique des plantes, s'exerçant à partir des réserves du sol ou de fumures variées, différait largement selon la texture des sols, la nature et les propriétés des argiles, et l'environnement cationique de celles-ci (BLANCHET *et al.*, 1962 *a*, 1965 ; BLANCHET et BOSC, 1966, 1967 *a*, *b*). Des faits comparables ont été également mis en évidence par de nombreux auteurs (VAN DER PAAUW, 1956 ; MAC LEAN, 1961 ; BECKETT, 1964).

En prenant comme exemples deux terres très différentes, nous voudrions tenter d'analyser ici, de manière plus détaillée, l'influence de ces divers caractères du sol sur les mécanismes que met en jeu l'alimentation potassique.

Au niveau de ces relations plantes-sols, trois phénomènes principaux nous

paraissent concernés (FRIED et SHAPIRO, 1961 ; BARBER, 1962 ; BRAY, 1963 ; NYE, 1966) :

— la rétention plus ou moins forte des ions K^+ par les constituants du sol, et notamment les argiles ;

— la diffusion de ces ions, sous l'effet d'un gradient de concentration, provoqué soit par l'absorption des racines, soit par la dissolution de granules d'engrais ;

— leur transport par la phase liquide du sol, dont le déplacement est dû au courant de transpiration (« mass-flow ») ; ce mouvement de la phase liquide, qui renferme des électrolytes, entraîne lui-même des réactions d'échange susceptibles de modifier la répartition des ions K^+ (NYE, 1966 ; BLANCHET et BOSC, 1967).

Sur deux sols de textures très différentes, où les principaux caractères de l'alimentation potassique des plantes ont été comparés (BLANCHET et BOSC, 1966 *a*, 1967 *b*), nous étudierons expérimentalement chacun des points ci-dessus. Tous ces processus sont extrêmement complexes, et, ainsi que l'ont montré récemment FRIED et BROESHART (1967) dans une large discussion, il est très difficile de distinguer la part de chacun d'eux dans l'alimentation de la plante. En effet, les incertitudes qui pèsent sur la mesure, le calcul ou l'interprétation des divers paramètres sont telles que l'ordre de grandeur des résultats obtenus peut varier considérablement.

Notre objectif étant ici essentiellement agronomique, nous nous tiendrons sur un terrain strictement expérimental, souvent assez qualitatif et global, en tâchant surtout de comparer et de hiérarchiser l'action des divers facteurs dans les deux sols étudiés. Nous tenterons enfin de mieux préciser la disponibilité des réserves potassiques, les conditions de l'alimentation dans les deux cas, et les implications concernant la fertilisation.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

Celles-ci ont été très diverses, et sont schématisées sur la figure 1.

A. — *Sols étudiés*

Les études ont porté sur les deux principaux types de sols rencontrés dans la région toulousaine :

— sols argileux, souvent légèrement calcaires, peu évolués, formés sur molasses tertiaires (BOSC *et al.*, 1962 ; MAYEUX, 1961) ;

— sols limono-sableux lessivés sur alluvions anciennes de la Garonne et de ses affluents (MARTY et FIORAMONTI, 1965 ; MARTY et BOSC, 1969).

Les aspects généraux et les propriétés physico-chimiques des échantillons utilisés ont été décrits en détail par ailleurs (BLANCHET *et al.*, 1966 *b*), ainsi que la nature de leurs argiles, et les grandes lignes de leur comportement à l'égard du potassium (BLANCHET et BOSC, 1967 *b*). Le tableau 1 résume les caractères essentiels des prélèvements des couches arables de chacun des types, que nous prendrons ici comme exemples. Signalons que la fraction limoneuse de ces sols argileux présente généralement une légère capacité d'échange (0,05 à 0,10 méq/g) ; les limons des sols limono-sableux, par contre, ne possèdent que de très faibles propriétés d'échange (MARTY et BOSC, 1969).

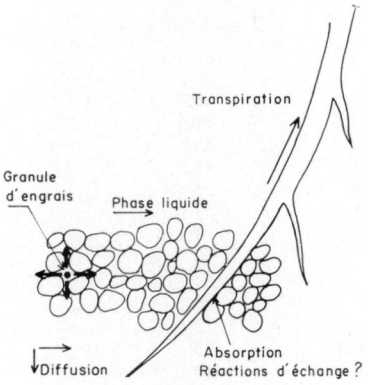
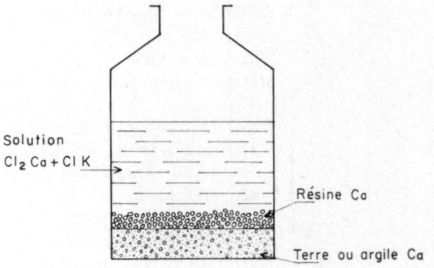
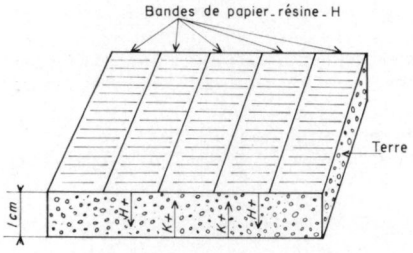


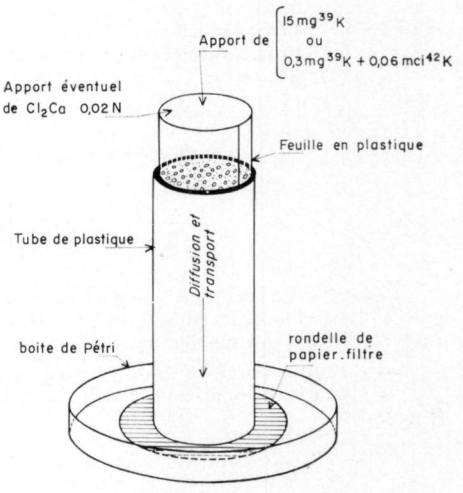
Schéma des processus intervenant dans l'alimentation



Etude des équilibres



Echange et diffusion sous l'effet de l'appauvrissement



Diffusion sous l'effet d'enrichissement
Transport par déplacement de phase liquide

FIG. 1. — *Schéma des conditions expérimentales réalisées*

TABLEAU I

Principaux caractères des sols étudiés

	Sol argileux	Sol limono-sableux
Argile, p. 100 de terre fine	33,5	13,2
Limons fins 2-20 μ	20,2	26,1
Sables très fins 20-50 μ	14	44,3
Sables fins 50-200 μ	14	10,2
Sables grossiers	13	4,1
Matière organique	1,3	1,6
pH	7,7	7,8
Capacité d'échange de cations, méq/kg (acétate NH^4 N, pH 7)	204	57
Capacité au champ, eau p. 100 de terre sèche	23	17
K échangeable, p.p.m.	150	55
Indice de Van der MAREL, voie sèche (K fixé p. 100 K apporté)	53	19
Argiles : Capacité d'échange de cations, méq/g	0,45	0,32
Composition, p. 100 du total :		
Kaolinite	20	25
Chlorites	—	20
Illites ou Micas	40	40
Montmorillonite	—	10
Minéraux gonflants # 12 Å (1)	40	—
Quartz	—	5

(1) Cf. BLANCHET et BOSC, 1967 *b*).

B. — *Alimentation potassique des plantes*

Celle-ci a été étudiée d'une part au cours de diverses expérimentations au champ, et d'autre part en vases de végétation, selon des techniques précédemment décrites (BLANCHET et BOSC, 1967 *b*). Nous n'en rappellerons que les grandes lignes :

— Cultures d'orge en grands vases, avec des apports de 0 et 300 p.p.m. K.

— Cultures d'épuisement par le ray-grass, en petits vases, selon la méthode de CHAMINADE (1960).

C. — *Rétention du potassium par les sols et leurs fractions argileuses*

« L'affinité » de ces sols pour les ions K^+ a été comparée en les mettant en présence de suspensions aqueuses de résine-Ca Amberlite IR 120 additionnée éventuellement de 100 ou 300 p.p.m. K (ARNOLD, 1958) ; divers rapports sol/résine ont été réalisés, et les suspensions étaient agitées pendant des durées variables.

Les argiles-Ca extraites de ces sols par des techniques très douces (BLANCHET *et al.*, 1965) étaient également placées en présence de 1 g de la même résine-Ca, dans 15 ml de solution contenant un mélange de chlorures de calcium et de potassium de concentration ionique constante (0,017 N), et de telle sorte que les rapports K/Ca échangeables dans les argiles varient d'environ 0 à 20 (en méq.). En même temps, le rapport K/Ca dans la résine variait de 0 à 2,5. Les quantités d'argiles de sols, ou de Montmorillonite et Kaolinite pures, étaient telles que la capacité d'échange de cations de ces échantillons soit uniforme (0,15 méq.). Après une agitation d'une heure, la phase liquide était séparée de la résine d'une part, et de l'argile d'autre part, et le potassium était dosé dans chacun des constituants (K échangeable, dans le cas de l'argile).

D. — *Diffusion des ions K^+ sous l'effet d'un appauvrissement local*

Dans ces essais, nous avons utilisé une technique très voisine de celle de VAIDYANATHAN et NYE (1966) : les terres tamisées à 1 mm et amenées à la limite de liquidité, ont été disposées en fines couches de 1, 3 ou 6 mm d'épaisseur, et de 20 cm^2 de surface, dans une enceinte où leur humidité restait constante. Des bandes de « papier-résine », c'est-à-dire de résine-cationique-H^+ incluse dans des fibres cellulosiques, étaient soigneusement disposées à la surface de ces milieux, puis enlevées et remplacées éventuellement par de nouvelles bandes, au bout de temps variés (le plus souvent une heure, cf. référence citée). La résine était enfin éluée par HCl 0,2 N, pour doser la quantité de potassium prélevée.

E. — *Diffusion des ions K^+ sous l'effet d'un enrichissement local*

Ces études ont été réalisées sur de petits cylindres de terre de 2 cm^2 de section et 5 cm de longueur, entourés d'un manchon de matière plastique. La terre, amenée à la capacité de rétention en eau, était enrichie à l'une des extrémités du cylindre par l'apport d'un très petit volume (0,1 ml) de solution contenant, sous forme de KCl, soit 15 mg ^{39}K, soit 0,3 mg ^{39}K et 0,06 mCi ^{42}K, soit enfin 15 mg ^{39}K et 0,06 mCi ^{42}K. L'apport de potassium représentait ainsi, dans le premier cas, 1 000 p.p.m. de sol, c'est-à-dire des conditions correspondant à une forte fumure localisée, et, dans le deuxième cas, 20 p.p.m. de sol, soit une fumure ordinaire. En l'absence de ^{42}K, l'apport d'une forte dose était nécessaire pour bien distinguer les mouvements, en raison des rétrogradations susceptibles d'intervenir. En présence de ^{42}K, les mouvements sont beaucoup plus facilement décelés, et l'utilisation d'une faible fumure est possible. Les rétrogradations ont été mesurées dans les deux cas, en dosant les quantités d'éléments restées échangeables, de manière à bien comparer les résultats obtenus avec ^{39}K et ^{42}K (cf. ci-dessous, fig. 4).

Les cylindres étaient ensuite placés dans une enceinte à 20°C où leur humidité demeurait constante, et, après des durées variant de quelques heures à 5 jours, ils étaient découpés, depuis le sommet, en tranches de 5,5,10,10 et 20 mm. Les ions ^{39}K échangeables étaient extraits et dosés, sur chacune de ces tranches ; ^{42}K était mesuré directement sur un gramme de terre sèche placée dans une coupelle.

F. — *Transport par la phase liquide*

Les essais ont été réalisés sur les mêmes cylindres de terre, en apportant des doses de ^{39}K et ^{42}K identiques aux précédentes. Ces cylindres étaient disposés sur un petit filtre sans cendres placé lui-même sur une boîte de Petri ; un couvercle surmontant la terre empêchait le dessèchement superficiel de celle-ci (fig. 1). Le mouvement de la phase liquide était obtenu en ajoutant au sommet du cylindre, toutes les 12 heures, 0,6 ml d'eau ou de solution 0,02 N de chlorure de calcium. Cette faible charge, ajoutée à la légère succion exercée par le papier-filtre, assurait le mouvement d'eau dans le sol, sans que l'humidité de celui-ci diffère nettement de la capacité au champ. L'atmosphère ambiante (température 20°C, degré hygrométrique 35 p. 100) permettait l'évaporation de l'eau à partir du papier-filtre, au fur et à mesure de la succion. En fin d'expérience, le découpage des tranches et les dosages étaient effectués comme précédemment ; les ions K^+ éventuellement passés dans le papier-filtre étaient également dosés, après incinération de celui-ci.

L'apport d'eau de 0,05 ml par heure correspond sensiblement à une transpiration de 0,5 mm/heure d'une culture de blé au stade tallage, comptant 200 plants/m^2, et dont la surface racinaire (poils radiculaires non compris), serait de 100 cm^2 (MAERTENS, 1969). Il s'agit donc de conditions voisines de celles que l'on peut observer au champ.

II. — RÉSULTATS OBTENUS

A. — *Alimentation potassique des plantes*

Le tableau 2 résume les principaux caractères de cette alimentation dans diverses conditions. De l'ensemble des résultats, il ressort très nettement que le sol limono-sableux cède très rapidement ses réserves à la plante ; ce processus est accompagné

d'une libération d'ions K^+ initialement non échangeables, que nous avons examinée par ailleurs (BLANCHET et BOSC, 1966 *a*, 1967 *b*).

TABLEAU 2

Comparaison de l'alimentation potassique des plantes dans les deux types de sols

	Sol argileux	Sol limono-sableux
K total, p. 100 de terre.....	2,37	1,07
K échangeable, p.p.m. de terre	150	55
Essais d'épuisement par le ray-grass		
K absorbé à la 1re coupe, p.p.m. de terre	76	99
K absorbé à la 2e coupe.....	82	51
K absorbé en 8 coupes.....	555	227
K échangeable en fin de culture, p.p.m. de terre.....	86	43
K non échangeable libéré.....	491	215
Cultures d'orge		
K absorbé par les plantes, p.p.m. de terre, sans fumure K	129	113
+ 300 p.p.m. K	322	319
Rapport $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K échangeable initial}}$		
Sans fumure K	0,86	2,05
Rapport $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K échangeable final}}$		
Sans fumure K	0,75	2,51
+ 300 p.p.m. K	1,63	4,37

Dans le sol argileux, les réserves plus abondantes sont cédées lentement au végétal, et de manière plus limitée. Ces faits ont été confirmés par de nombreuses expérimentations au champ. Ce sont les raisons de cette différence de comportement des deux sols que nous allons maintenant tâcher d'éclairer.

B. — *Comparaison de la rétention des ions K^+ par les sols et leurs fractions argileuses*

Le tableau 3 indique les répartitions d'ions K^+ obtenues entre les terres et la résine-Ca, dans des conditions variées. De même qu'en présence des plantes, le sol limono-sableux cède beaucoup plus aisément ses réserves que le sol argileux. La comparaison des rapports $\frac{\text{CEC résine}}{\text{CEC sols}}$, c'est-à-dire des capacités d'échange mises en œuvre d'une part, et des rapports finaux $\frac{\text{K résine}}{\text{K sol}}$, d'autre part, montre que cette différence de cession des ions K^+ est essentiellement due à la CEC plus faible

du sol limono-sableux (57 méq/kg, au lieu de 204 méq/kg pour le sol argileux). La même conclusion apparaît lorsque la résine est enrichie en K.

TABLEAU 3

Répartition du potassium entre les sols et la résine-Ca enrichie ou non en potassium : rapport $\frac{K \text{ final dans la résine}}{K \text{ échangeable final du sol}}$

	Rapport pondéral $\frac{\text{résine}}{\text{sol}}$	Durée de contact (mn)	Sol argileux	Sol limono-sableux
Appauvrissement du sol par la résine-Ca	0,2	2	0,14	0,30
	0,2	60	0,19	0,47
	5	2	1,85	2,95
	5	60	2,50	3,04
Contact avec la résine-Ca enrichie en K				
Résine avec 100 p.p.m. K	0,2	60	0,93	2,30
Résine avec 300 p.p.m. K	0,2	60	0,96	2,60
Rapports $\frac{\text{CEC résine}}{\text{CEC sols}}$: $\frac{\text{Résine}}{\text{Sol}} = 0,2$ ..			4,2	15,0
$\frac{\text{Résine}}{\text{Sol}} = 5$			105	380

Cette interprétation est confirmée par l'examen de la rétention du potassium par les fractions argileuses de ces terres. La figure 2 représente, en fonction de la

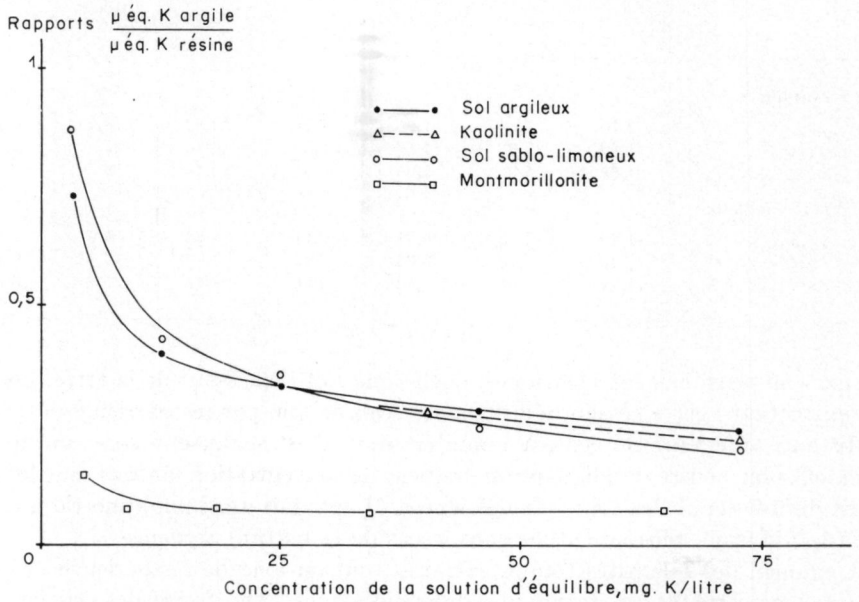


FIG. 2. — *Partage des ions K^+ entre la résine et les diverses argiles en fonction de la concentration en potassium de la phase liquide*

concentration de la phase liquide, le partage du potassium entre la résine et des masses d'argiles correspondant à une même CEC. Quoique ce partage varie selon les quantités de potassium introduites, il diffère très peu de l'une à l'autre des argiles de sols, et les sites de rétention des ions K^+ exercent les mêmes propriétés dans les deux cas. Ils sont toutefois beaucoup plus nombreux dans le sol argileux, où l'argile est plus abondante et possède une capacité d'échange de cations plus élevée.

Ces différences de texture et de capacités d'échange peuvent avoir également d'autres répercussions sur la dynamique des ions K^+ ; c'est ce que nous allons examiner maintenant, en faisant appel non plus à des suspensions, mais à des taux d'humidité voisins de ceux que l'on rencontre au champ.

C. — *Diffusion des ions K^+ sous l'effet de l'appauvrissement par le papier-résine*

Le tableau 4 montre que les quantités de potassium extraites par la résine augmentent avec l'épaisseur de la couche de terre dès la première extraction, dans le sol limono-sableux. Cela signifie que la diffusion des ions K^+ a déjà intéressé une distance supérieure à 3 mm. En sol argileux, par contre, les quantités de potassium cédées à

TABLEAU 4

Extraction du potassium par le papier-résine sur des couches de terre de diverses épaisseurs

Épaisseur approximative des couches, mm	K extrait après extractions successives, (µéq.)					K échangeable initial (µéq.)	$\frac{\text{K extrait}}{\text{K échang.}}$
	1re	2e à 5e	6e	12e	Total 13 extractions		
Sol argileux							
1	2,10	7,30	1,06	0,28	14,82	18,4	0,81
3	1,82	7,02	1,10	0,62	16,54	37	0,45
6	1,88	6,94	1,08	0,56	16,10	59	0,27
Sol limono-sableux							
1	1,28	1,83	0,21	0,11	4,85	4,6	1,05
3	1,36	2,70	0,35	0,22	7,43	17,1	0,43
6	1,44	3,06	0,42	0,30	8,18	25,7	0,32

la résine sont sensiblement identiques, quelle que soit l'épaisseur de la terre, jusqu'à la 6e extraction ; cette cession n'a donc été réalisée que par les particules situées à une distance inférieure ou égale à 1 mm environ. C'est seulement après un appauvrissement plus poussé, impliquant un gradient de concentration marqué, que les ions K^+ ont diffusé depuis les zones plus éloignées. Il apparaît ainsi une « inertie », ou un frein à la diffusion, plus accentués dans le cas de la texture argileuse.

L'examen des quantités totales extraites tout au long de l'expérience (tabl. 4) confirme bien cette interprétation : les différences dues à l'épaisseur des couches sont moins accusées dans le sol argileux que dans le sol limono-sableux. Pour celui-ci,

une libération d'ions K^+ initialement non échangeables est en outre intervenue dans la tranche plus mince. Notons cependant que les rapports K extrait/K échangeable ne diffèrent pas considérablement d'une terre à l'autre.

Ainsi, la diffusion a été plus rapide en sol limono-sableux, mais ce résultat apparaît plutôt dû aux différences de capacités d'échange que de textures. Il s'agit en effet d'une « contre-diffusion » (PHILIPS et BROWN, 1964), dans laquelle la résine cède au sol des ions H^+ qui s'échangent contre des ions Ca^{++} et K^+ (VAIDYANATHAN et NYE, 1966). La faible capacité d'échange du sol limono-sableux a permis à ces échanges de s'effectuer à de plus grandes distances de la zone de contact des deux adsorbants, et favorisé l'ensemble de la diffusion.

D. — *Diffusion des ions K^+ sous l'effet de l'enrichissement local et transport par la phase liquide*

Nous distinguerons ici les deux cas, nettement différents, de l'enrichissement important pouvant correspondre à une très forte fumure localisée (1 000 p.p.m.), et de l'apport modéré se rapprochant d'une fumure habituelle (20 p.p.m.) étudié par ^{42}K.

1. *Enrichissement important.*

La figure 3 indique l'ensemble des résultats obtenus. Dans la simple diffusion, sans mouvement de phase liquide, les deux sols se différencient nettement : le gradient de concentration est en effet beaucoup plus marqué dans la terre argileuse, où la diffusion a été plus réduite, ce qui confirme les résultats obtenus avec la technique du papier-résine.

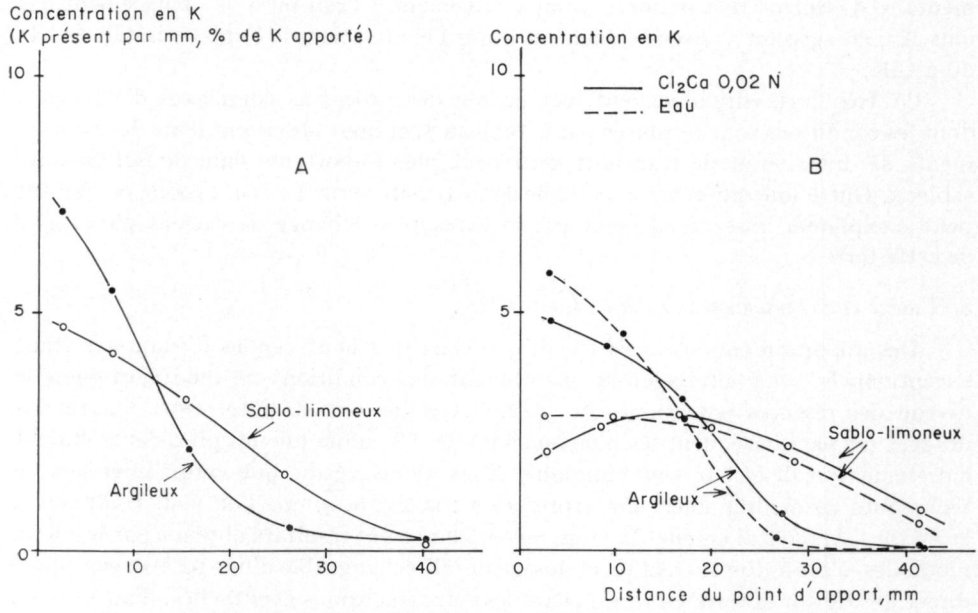


FIG. 3. — *Mouvements d'ions K^+ obtenus en cinq jours, après l'apport de 15 mg K avec ou sans mouvement de phase liquide*

A = Sans mouvement de phase liquide.
B = Avec passage de 0,04 ml/heure d'eau ou de solution 0,02 N de Cl_2Ca.

L'écart s'accentue encore lorsque l'on provoque le déplacement de la phase liquide : les ions K^+ demeurent retenus dans les premiers centimètres du sol argileux, alors qu'ils sont beaucoup plus énergiquement repoussés vers le bas du cylindre dans le sol sablo-limoneux. Les effets de l'eau pure et de la solution saline diluée sont voisins dans ces conditions expérimentales, car l'addition de ClK représentait une quantité d'électrolyte (0,385 méq. Cl^-) plus élevée que celle due à Cl_2Ca (0,1 méq., cf. tabl. 5). On remarque toutefois, sur le graphique 3 B, que cette quantité supplémentaire d'électrolyte a renforcé, comparativement à l'eau pure, le déplacement des ions K^+, en agissant vraisemblablement après l'élimination de l'apport initial de Cl^- dû à ClK.

TABLEAU 5

Conditions d'échange réalisées au cours des essais d'enrichissement avec mouvements de phase liquide

Caractères des sols	Sol argileux	Sol limono-sableux
Capacité d'échange de cations, µéq/g	204	57
CEC de 15 g de terre, µéq.	3 060	855
Cations introduits, en µéq.	*En p. 100 de la CEC du sol*	
15 mg K = 385 µéq.	12,6	45
0,3 mg K = 7,7 µéq.	0,25	0,9
5 ml Cl_2Ca 0,02 N = 100 µéq. Ca	3,3	11,7

Ce très fort enrichissement met en jeu des processus complexes d'échanges, dont les conditions sont résumées par le tableau 5, et nous observons donc des mouvements de diffusion et de transport nettement plus importants dans le sol limono-sableux. Outre une différence éventuelle de tortuosité (PORTER *et al.*, 1960), ce résultat peut s'expliquer assez facilement par la capacité d'échange de cations plus faible de cette terre.

2. *Faible enrichissement et introduction de* ^{42}K.

Des apports d'engrais aussi élevés que ceux que nous venons d'examiner étant exceptionnels, nous envisagerons maintenant des conditions ne modifiant guère le niveau des réserves potassiques des sols. Ces essais ont été interprétés d'après les dosages (et par conséquent les mouvements) de ^{42}K, alors que les précédents étaient entièrement réalisés par voie chimique. Nous avons vérifié que cette différence de techniques ne modifie guère l'interprétation : la figure 4, que l'on peut comparer à la figure 3 A, montre en effet la large ressemblance des résultats obtenus par les deux méthodes, c'est-à-dire extraction et dosage de ^{39}K échangeable d'une part, et comptage direct de ^{42}K sur la terre en retranchant les rétrogradations éventuelles, d'autre part. Dans ce dernier cas, on mesure donc essentiellement des mouvements d'ions $^{42}K^+$, introduits avec une faible quantité d'ions $^{39}K^+$, puisque des solutions de ^{42}K sans entraîneur ne peuvent malheureusement pas être utilisées. Quoique les processus mis

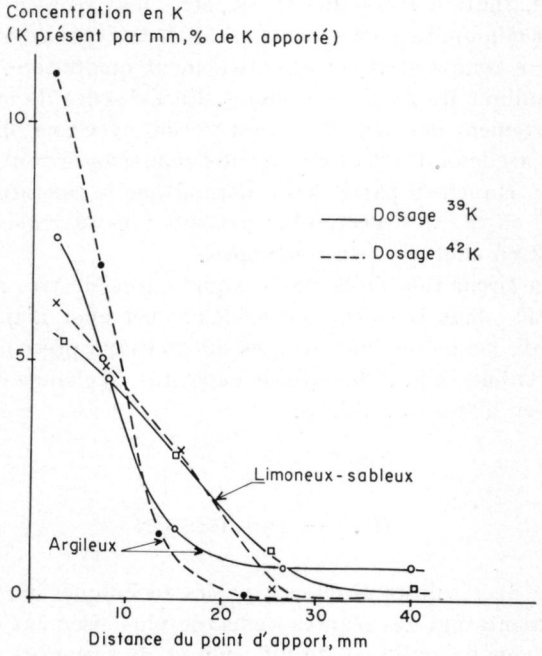


FIG. 4. — *Comparaison des résultats obtenus par dosages de ^{39}K ou de ^{42}K, sur les deux sols 48 heures après l'apport de ^{39}K seul, ou de la même quantité de ^{39}K additionnée de ^{42}K*

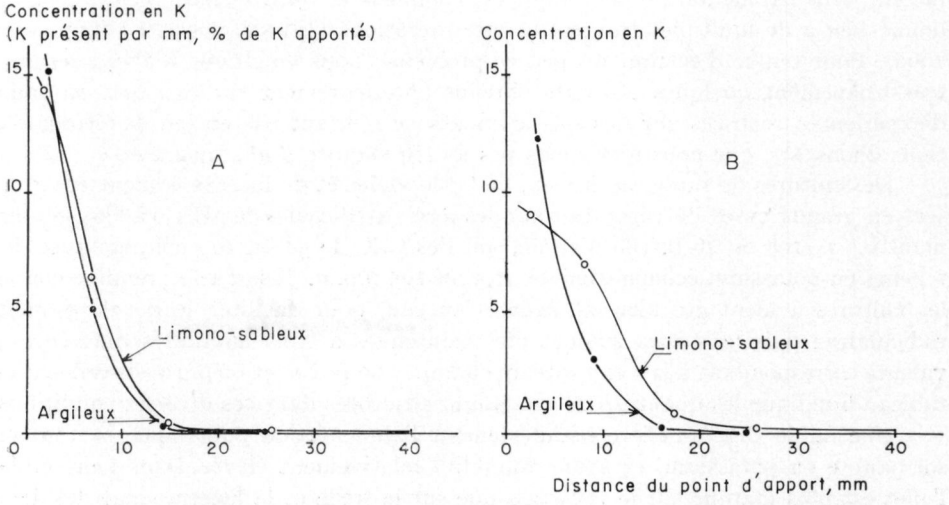


FIG. 5. — *Mouvements d'ions $^{42}K^{+}$ obtenus en quatre jours, après l'apport de 0,3 mg ^{39}K et 0,06 mCi ^{42}K, avec ou sans mouvement de phase liquide*

A = Sans mouvement de phase liquide.
B = Avec passage de 0,05 ml/heure de solution 0,02 N de Cl_2Ca.

en jeu dans ces mouvements soient complexes (gradients de concentrations différents selon $^{39}K^+$ ou $^{42}K^+$, dilution isotopique de ^{42}K, etc.), il s'agit bien de divers aspects de la circulation et de la mobilité de ces ions dans les deux types de sols, que nous examinons ici de manière comparative, et essentiellement qualitative.

La figure 5 indique les résultats obtenus. En l'absence de mouvement de phase liquide, le comportement des deux terres est voisin, avec une diffusion un peu plus réduite dans le sol argileux. Il est probable que l'on assiste surtout ici à la distribution propre de ^{42}K, sur laquelle il paraît assez normal que la constitution du sol n'intervienne guère, sauf en ce qui concerne la tortuosité ; les réactions d'échange proprement dites ne sont en effet que peu concernées.

Par contre, la circulation de la phase liquide accélère très nettement les mouvements d'ions $^{42}K^+$ dans le sol limono-sableux ; cet effet n'apparaît presque pas dans le sol argileux. De même que dans les divers essais précédents, il semble bien que l'on puisse attribuer à la différence de capacités d'échange de cations ces deux comportements bien distincts (tabl. 5).

III. — DISCUSSION

Cet ensemble de résultats obtenus par des techniques très diverses apparaît concordant : l'alimentation des plantes s'effectue plus aisément dans le sol limono-sableux, et les études d'équilibres, de diffusion et de transport d'ions K^+, laissent bien prévoir leur meilleure disponibilité à l'égard du végétal.

Tout au long de l'examen de ces résultats, un caractère distinctif des deux sols est apparu prédominant : leurs capacités d'échange de cations. L'intervention de ce facteur dans l'alimentation potassique est complexe et controversée, bien qu'elle ait donné lieu à de multiples travaux et interprétations (JENNY, 1953 ; LAGERWERFF, 1960). Pour tenter d'éclairer un peu ce problème, nous voudrions d'abord résumer très brièvement quelques résultats obtenus antérieurement sur ce sujet, au cours d'expériences réalisées sur des sols artificiels ne mettant pas en jeu de rétrogradations d'ions K^+, que nous n'étudions pas ici (BLANCHET *et al.*, 1962 *a* et *b*).

Des cultures de ray-grass italien, de trèfle violet et de luzerne avaient été réalisées en grands vases de végétation sur des terres artificielles de pH 7,9 à 8,05, renfermant 6,5 p. 100 ou 26 p. 100 d'argile, soit des CEC de 50 ou 200 méq/kg, avec des teneurs en potassium échangeable de 97,5 ou 195 p.p.m. Jusqu'à la première coupe, les cultures avaient été bien alimentées en eau, pour faciliter le développement radiculaire ; puis les terres avaient été maintenues à trois humidités différentes : valeurs correspondant à la « capacité au champ », 80 p. 100 et 60 p. 100 de celle-ci. Le tableau 6 indique les quantités de potassium absorbées dans ces diverses conditions.

Une faible CEC améliore manifestement l'alimentation potassique, surtout en sol pauvre en potassium, et à une humidité relativement élevée. Dans l'ensemble, l'effet est plus marqué sur le ray-grass que sur le trèfle et la luzerne, mais les deux caractères de pauvreté et d'humidité s'appliquent à l'influence de la CEC sur les trois cultures. Ce sont précisément les conditions dans lesquelles les mouvements d'ions K^+ revêtent le plus d'importance (pauvreté) et peuvent le mieux s'effectuer (humidité, par diffusion et flux de phase liquide).

Nous essaierons maintenant de confronter ces résultats globaux aux divers facteurs de l'alimentation que nous avons étudiés ici, de manière à mieux dégager

TABLEAU 6

Influence de l'humidité, de la teneur en potassium et de la capacité d'échange de cations du sol sur l'alimentation potassique de diverses plantes

Humidité réalisée après 1re coupe	K éch. (p.p.m. de sol)	CEC (méq/kg de sol)	K absorbé, mg par pot		
			Ray-grass (3 coupes)	Trèfle (2 coupes)	Luzerne (2 coupes)
« Capacité au champ » ..	97,5	50	690	557	482
	—	200	497	317	350
	195	50	1 195	1 152	1 056
	—	200	987	863	1 023
80 p. 100 c.c.....	97,5	50	647	520	557
	—	200	471	394	404
	195	50	1 124	991	1 092
	—	200	860	977	931
60 p. 100 c.c.	97,5	50	483	353	434
	—	200	393	269	324
	195	50	1 174	816	807
	—	200	755	780	972

leurs rôles respectifs, et notamment l'influence des réactions d'échange de cations dans les deux sols naturels de types différents que nous avons pris comme exemples.

Le tableau 7 schématise l'ensemble des données recueillies. Les différences de

TABLEAU 7

Récapitulation des principaux résultats obtenus

Caractère étudié	Test	Résultats et interprétation
Équilibres d'échange	Sols-résines Argiles-résines	Sur les sols étudiés, les équilibres sont fonction des CEC en présence.
Diffusion sans mouvement d'eau		
a) Réactions d'échange interviennent	Papier-résine Très fort apport localisé de K	Différenciation nette des deux sols ; la meilleure diffusion en sol limono-sableux s'explique valablement par la plus faible CEC.
b) Réactions d'échange n'interviennent guère	Distribution de ^{42}K	Comportement très voisin des deux sols : très faible effet de la texture.
Déplacement par mouvements de phase liquide	Après fort apport de K Après faible apport + ^{42}K	Transport important dans le sol sablo-limoneux de faible CEC ; transport faible dans le sol argileux.
Alimentation des plantes	Cultures en vases de végétation	Disponibilité beaucoup plus grande des réserves en sol sablo-limoneux.

comportement des deux terres ne s'expliquent pas par la nature des propriétés d'adsorption du potassium sur les argiles. Cependant, le nombre des sites intéressés dépend de la capacité d'échange de la fraction minérale du sol, c'est-à-dire de la teneur en argiles et de leur nature, ainsi que de la présence éventuelle de limons phylliteux possédant des propriétés d'échange, comme dans le cas du sol argileux étudié ici. Dans les sols cultivés des régions tempérées, la part de la capacité d'échange due aux matières organiques, quoique quantitativement importante parfois, ne semble pas marquer considérablement les caractères de la dynamique du potassium (CHAMINADE, 1955). L'influence des minéraux argileux est donc prédominante, quoique les équilibres de partage sol-résine, ou sol-solution, soient essentiellement déterminés par la capacité globale d'échange qui règle ainsi la « pression » des ions K^+ dans la phase liquide, facteur important de la diffusion.

Dans cette diffusion des ions K^+, la texture intervient aussi directement par une tortuosité variable avec les dimensions des particules. Cet effet apparaît ici peu important (distribution de ^{42}K). Toutefois, l'influence de la texture dans la diffusion est complexe et liée notamment à la teneur en eau, qui joue un rôle considérable (PORTER *et al.*, 1960 ; BLANCHET *et al.*, 1969 ; CALVET, 1969). Cette complexité rend assez douteuse, dans les conditions agronomiques, une caractérisation des sols par des coefficients de diffusion établis de manière relativement simple.

Le caractère argileux correspond le plus souvent à des capacités d'échange élevées, qui offrent davantage de sites d'adsorption, et sur lesquelles le flux de phase liquide est peu actif pour déplacer les ions K^+. Nous sommes en effet dans des conditions voisines d'une chromatographie d'échange d'ions (TRÉMILLON, 1965), quoique le sol et son environnement cationique soient d'une complexité telle qu'il paraît difficile d'appliquer à ces échanges une simple relation théorique d'élution. En première approximation, on peut admettre que la probabilité du déplacement d'un ion K^+ échangeable par un ion Ca^{++} de la phase liquide est fonction du rapport K^+/CEC.

Il en résulte que, pour une même teneur en potassium échangeable, le rôle de « piston » joué par le flux liquide en déplaçant les ions K^+ vers la rhizosphère est d'autant plus important que la capacité d'échange est plus faible. C'est bien ce qu'illustrent à la fois les figures 3 et 5 et le tableau 6.

Tous ces facteurs sont donc extrêmement imbriqués l'un-l'autre, et la capacité d'échange exerce de multiples effets, qui se conjuguent dans le même sens. On peut schématiser ainsi le rôle de CEC croissantes :

— Maintien en solution de quantités décroissantes d'ions K^+.

— Diffusion plus lente et limitée.

— Moindre déplacement des ions K^+ par les ions Ca^{++} transportés par les flux de phase liquide.

Pour une même teneur en potassium échangeable, le résultat est naturellement une alimentation plus difficile, ainsi que nous l'avons constaté (tabl. 2 et 6). Un autre caractère intervient toutefois, corollaire des mouvements d'ions : il s'agit du degré d'exploration du sol par le chevelu racinaire. Dans l'alimentation de la plante, ces mouvements d'ions ont en effet une importance d'autant plus grande que le sol est plus pauvre, et moins exploré par les racines.

De façon générale, nous arrivons bien à l'indication, souvent vérifiée dans la

pratique agricole, de la nécessité de réserves plus importantes en sols argileux, avec diverses modalités dues principalement aux variations de la nature et de la capacité d'échange des argiles.

CONCLUSIONS

L'alimentation potassique des plantes dans le sol met en jeu un ensemble de mécanismes très complexes et interdépendants, parmi lesquels les réactions d'échange jouent des rôles multiples. Si la présence de quantités variables d'autres cations n'influence pas considérablement l'aspect physiologique de l'absorption du potassium par les racines (BLANCHET *et al.*, 1962 *a*), la capacité d'échange du sol et l'environnement cationique interviennent largement dans les équilibres d'adsorption, la diffusion et le transport des ions K^+. C'est surtout en ce sens qu'il faut, nous semble-t-il, comprendre les interactions cationiques concernant l'alimentation potassique, au niveau du sol.

Outre ces processus relatifs au potassium échangeable, l'action de la texture et de la nature des minéraux s'exerce naturellement sur les rétrogradations et libérations d'ions K^+, dont l'importance peut être considérable.

Dans ces conditions, il apparaît clairement que l'on ne peut espérer caractériser le niveau et la disponibilité des réserves potassiques du sol à l'aide d'un seul critère, tel que la teneur en potassium échangeable. Celle-ci demeure certes importante à considérer, mais il convient de la replacer dans tout son contexte textural et minéralogique, et aussi dans le cadre d'un régime hydrique global, tel que la culture sèche ou irriguée par exemple, dont nous avons montré par ailleurs l'influence très marquée (BLANCHET *et al.*, 1969). C'est une vue dynamique de l'alimentation qui s'impose, plutôt qu'un aspect statique.

Tous ces facteurs sont malheureusement bien difficiles à traduire en équation. Il appartient à l'agronome de porter un jugement d'ensemble, et d'en tirer les conséquences relatives à la fertilisation. La mobilité beaucoup plus grande des ions K^+ dans une texture légère accompagnée d'une faible capacité d'échange ne nécessite pas la constitution de réserves importantes dans le sol, mais plutôt une fumure bien appropriée aux besoins des cultures. Par contre, il paraît nécessaire d'entretenir un stock d'autant plus abondant que les terres sont plus argileuses, surtout si leur capacité d'échange est élevée.

Reçu pour publication en septembre 1969.

SUMMARY

EXCHANGE REACTIONS AND CHIEF FACTORS OF POTASSIC PLANT NUTRITION IN TWO SOILS OF DIFFERENT TEXTURE

The adsorption equilibria of K^+ ions and their diffusion under the effect of a gradient of concentrations, together with their mass flow, have been investigated in two soils of different textures, clay and sandy loam, respectively. The results have evinced the following :

— the amounts of exchangeable potassium extracted with a Ca resin are substantially an inverse function of the cation exchanging capacity (C. E. C.) ; the retention sites of the potassium on the clays extracted from these two soils exhibit similar properties ;

— owing to the effect of a localized depletion or enrichment, the diffusion of K^+ ions takes place faster and more extensively in the sandy loam soil. Besides a meandering effect, the C. E. C. has a determinental influence, as show the differences between pronounced and slight enrichments (the latter investigated with ^{42}K) ;

— on occurrence of mass flow, the exchange reactions taking place with the Ca^{++} ions permit of a more widespread migration in presence of a low C. E. C ;

— the upshot of these various processes is an improved availability of the mineral reserves of the sandy loam soil, the plant faring better.

The interpendences between the exchange reactions, the moisture content, the diffusion and ion transport are fully discussed, together with the consequences for plant nutrition and fertilization.

ZUSAMMENFASSUNG

AUSTAUSCHREAKTIONEN UND HAUPTFAKTOREN DER KALIERNÄHRUNG DER PFLANZEN BEI ZWEI VERSCHIEDENEN BODENBESCHAFFENHEITEN

Die Adsorptionsgleichgewichte der K^+ Ionen, die Diffusion dieser Ionen under der Wirkung eines Konzentrationsgradienten und ihre Ortsveränderung durch die Bewegungen der flüssigen Phase wurden bei zwei Böden von verschiedener Beschaffenheit (tonige und sandlehmige) untersucht. Die Ergebnisse erlaubten die folgenden wesentlichsten Tatsachen festzustellen :

— Die durch ein Harz Ca extrahierten Mengen austauschbaren Kaliums stellen deutlich eine inverse Funktion des Austausch-Vermögens der Kationen (A. V. K.) dar. Die Lagender Kaliumretention gegenüber den aus diesen zwei Böden extrahierten Tonen weisen vergleichbare Eigenschaften auf.

— Unter der Wirkung einer lokalisierten Verarmung oder Anreicherung ist die Diffusion der K^+ Ionen rascher und umfangreicher in dem sandlehmigen Boden. Ausser einer mögleichen Verzerrungswirkung scheint das A. V. K. einen bestimmenden Einfluss auszuüven, wie es aus den beobachteten Unterschieden zwischen den schwachen (mit ^{42}K untersuchten) und ben beträchtlichen Anreicherungen hervorgeht.

— Bei der Ortsveränderung infolge der Bewegungen der flüssigen Phase (« mass-flow »), erlauben die mit den Ca^{++} Ionen auftretenden Austauschreaktionen eine viel bedeutendere Wanderung in Gegenwart eines schwadechen A. V. K.

— Aus diesen verschiedenen Verfahren ergibt sich eine bessere Verfügbarkeit der Bodenvorräte im Falle der sandlehmigen Veschaffenheit und eine bessere Ausnutzung durch die Pflanze.

Die Wechselbeziehungen zwischen den Austauschreaktionen, dem Feuchtigkeitsgrad, der Diffusion und den Ortswänderungen werden erörtert, ferner die Folgerungen, die sich auf die Ernährung der Pflanzen und die Düngung beziehen.

РЕЗЮМЕ

Реакции обмена и найглавнейшие факторы калийного питания растений в двух почвах различного механического состава.

Р. БЛАНШЭ, М. БОСК.

Авторы провели изучение равновесия адсорбции ионов K^+, диффузии этих ионов под влиянием градиента концентрации, и их совместного перемещения с движениями жидкой фазы, в двух почвах разного механического состава (глинистой и песчанно-суглинистой).

Полученные результаты выявили следующие пункты :

— Количества обменного калия экстрагированого при помощи смолы

Ca обратно пропорциональны емкости обмена катионов (C.E.C.); местоположения удержания калия на глинах экстрагированных из данных почв обладают одними и теми-же свойствами;

— Под влиянием местных обеднения или обогащения, диффузия ионов K^+ протекает быстрее и в более крупном масштабе в почвах песчанно-суглинистых. За исключением возможного эффекта извилистости, емкость обмена катионов, имеет как-будто решающее значение, что и доказывается наблюдавшимися различиями между незначительными и крупными обогащениями (изучение проводилось при помощи K^{42}).

— В перемещениях связанных с движениями жидкой фазы («mass-flow») обменные реакции с ионами Ca^{++} вызывали более значительную миграцию при слабой емкомсти обмена.

— Блогодаря всем этим процессам достигается лучшее освобождение почвенных запасов и лучшее их использование растениями в почвах песчанно-суглинистых. Авторы обсуждают взаимозависимости обменных реакций, процентов влажности, диффузии и транспорта ионов, а также последствия в отношении питания растений и удобрения почв.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNOLD P. W., 1958. Potassium uptake by cation exchange resins from soils and minerals. *Nature*, **6**, 1594-1595.

BARBER S. A., 1962. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.*, **93**, 39-49.

BECKETT P. H. T., 1964. Studies on soil potassium. II. The immediate Q/I relations of labile potassium in the soil. *J. Soil Sci.*, **15**, 9-23.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962 *a*. Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes. *Ann. agron.*, **13**, 175-201.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962 *b*. Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. *Ann. agron.*, **13**, 93-110.

BLANCHET R., GUYOT J., CHAUSSIDON J., CROUZET J., CHAUMONT C., 1965. Influence prédominante des argiles illitiques sur l'alimentation potassique des plantes dans divers types de sols. *Ann. agron.*, **16**, 177-202.

BLANCHET R., BOSC M., 1966 *a*. Rôle des équilibres d'échange dans la vitesse d'utilisation par les plantes du potassium initialement non échangeable des sols. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **263**, 822-825.

BLANCHET R., MAERTENS C., MARTY J. R., GELFI N., 1966 *b*. Influence des constituants minéraux de quelques types de sols sur leurs propriétés physiques et leurs possibilités culturales. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, **9**, 257-274.

BLANCHET R., BOSC M., 1967 *a*. Étude des principaux facteurs déterminant les mouvements d'ions potassium du sol vers un modèle de racine. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **265**, 1970-1973.

BLANCHET R., BOSC M., 1967 *b*. Bilans de potassium et alimentation potassique des plantes en présence de rétrogradations et de libérations d'ions K^+ non échangeables. *Ann. agron.*, **18**, 601-621.

BLANCHET R., BOSC M., MAERTENS C., 1969. Some interactions of cation nutrition and the water supply of plants. *C. R. Colloque Israel*, en cours d'impression, Inst. intern. Potasse, Berne.

BOSC M., FIORAMONTI S., MALTERRE H., 1962. Les sols de la commune de Mauremont, terroir-type du Lauragais. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, **6**, 320-336.

BRAY R. H., 1963. Confirmation of the nutrient mobility concept of soil-plant relationships. *Soil Sci.*, **95**, 124-130.

CALVET R., 1969. Auto-diffusion des ions adsorbés sur la montmorillonite. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **268**, 2541-2543.

CHAMINADE R., 1955. Le potassium et la matière organique. In *Potassium Symposium*, 203-214. Institut intern. Potasse, Berne.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. *Ann. agron.*, **11**, 121-134.

FRIED M., SHAPIRO R. E., 1961. Soil-plant relationships in ion uptake. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **12**, 91-112.

FRIED M., BROESHART H., 1967. *The soil-plant system*, p. 54-68. Academic Press, New York.

JENNY H., 1953. Contact phenomena between adsorbents and their significance in plant nutrition. In *Mineral Nutrition of Plants*, p. 107-132, édited by E. TRUOG, Univ. Wisconsin Press.

LAGERWERFF J. V., 1960. The contact-exchange theory amended. *Plant and Soil*, **13**, 253-264.

Mac LEAN A. J., 1961. Potassium supplying power of some Canadian soils. *Canad. J. Soil Sci.*, **41**, 196-206.

MAERTENS C., 1969. Communication personnelle de résultats non encore publiés.

MARTY J. R., FIORAMONTI S., 1965. Étude d'un secteur de sols de boulbènes sur alluvions anciennes de la Garonne. *Bull. Ass. fr. Et. Sol*, **6**, 224-264.

MARTY J. R., BOSC M., 1969. Capacité d'échange et caractéristiques minéralogiques de différentes fractions inférieures à 2 μ dans des terres du type boulbène. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **268**, 262-265.

MAYEUX J. C., 1961. *Étude chimique des sols de molasses, dynamique du potassium*, 84 pages. Gomes, Toulouse.

NYE P. H., 1966. Changes in the concentration of nutrients in the soil near planar absorbing surfaces when simultaneous diffusion and mass-flow occur. *Trans. Meet. internation. Soc. Soil Sci.*, Aberdeen, 317-327.

PHILIPS R. E., BROWN D. A., 1964. Ion diffusion : II. Comparison of apparent self and counter diffusion coefficients. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 758-763.

PORTER L. K., KEMPER W. D., JACKSON R. D., STEWART B. A., 1960. Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 460-463.

TRÉMILLON B., 1965. *Les séparations par les résines échangeuses d'ions*, 155-300, Gauthier-Villars, Paris.

VAIDYANATHAN L. V., NYE P. H., 1966. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. 2.An exchange resin paper method for measurement of the diffusive flux and diffusion coefficient of nutrient ions in soils. *J. Soil Sci.*, **17**, 175-183.

VAN DER PAAUW F., 1956. Calibration of soil-test methods for the determination of phosphate and potash status. *Plant and Soil*, **8**, 105-125.

Ann. agron., 1969, **20** (5), 475-504.

ÉTUDE DE L'INFILTRATION DE LA PLUIE *IN SITU* A L'AIDE DE TENSIOMÈTRES

A. FEODOROFF et J.-L. BALLIF (1)
avec la collaboration technique de P. GAY et J.-P. TOURNIER

Laboratoire des Sols,
Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

L'étude porte sur l'analyse de l'infiltration de six averses naturelles dans un sol en place. Les tensiomètres permettent de suivre les mouvements de l'eau en profondeur.

Dans une première partie on décrit le terrain étudié et les mesures systématiques effectuées. On présente ensuite le principe de l'utilisation du tensiomètre et la réalisation pratique des mesures.

La deuxième partie traite des résultats obtenus. Le tensiomètre indique si l'eau d'infiltration atteint ou non une profondeur considérée. Les observations permettent donc de vérifier que si la hauteur de pluie P est inférieure au déficit hydrique D du sol, la précipitation est retenue dans les couches de surface. Si $P > D$, l'excès s'écoule vers la nappe. En outre on a pu, à l'aide des tensiomètres, calculer la vitesse d'infiltration et le taux de remplissage de la porosité du sol par l'eau et suivre le drainage consécutif à la pluie.

Dans une annexe on donne une description détaillée des tensiomètres : principe, limites de l'emploi, influence de facteurs externes.

INTRODUCTION

La connaissance des processus d'infiltration dans le sol répond à toute une série de préoccupations agronomiques telles que :

— partage entre infiltration et ruissellement et donc risque d'érosion ;
— reconstitution de la réserve en eau du sol utilisable par les plantes ;
— assainissement des terres ;
— recharge naturelle ou artificielle de la nappe, fonctionnement des drainages ;
— entraînement des éléments solubles utiles (engrais) ou toxiques.

(1) Adresse actuelle : Station d'Agronomie, 2, Bd Vaubecourt, 51 - Châlons-sur-Marne.

L'étude de ces problèmes peut être abordée en laboratoire. Cette approche a l'avantage de permettre le contrôle d'un certain nombre de paramètres (humidité initiale du sol, intensité et durée de la pluie) et de faciliter les observations sur l'avancement d'un front humide et l'évolution de la répartition de l'eau. Toutefois, il est difficile de reconstituer *in vitro* des conditions de sol (structure, profondeur, distribution de l'humidité avant la pluie) proches de celles qui prévalent dans la nature. C'est pourquoi nous avons cherché à élaborer une méthode pour étudier l'infiltration *in situ*. Elle consiste essentiellement à procéder à des mesures périodiques d'humidité du sol, de la pluie, du niveau piézométrique. Les mesures d'humidité permettent de caractériser la distribution de l'eau avant et après la pluie et en outre d'estimer la capacité de rétention du sol. Mais pour suivre les phénomènes dynamiques il fallait une possibilité d'observation dans la masse du sol : nous avons utilisé à cet effet les réactions de deux tensiomètres.

Les résultats dont il sera question portent sur l'étude d'un certain nombre d'événements (pluies) naturels, dont les composantes (distribution de l'eau dans le sol avant la pluie ; durée, hauteur et intensité de la pluie) échappaient donc à notre contrôle mais étaient connues *a posteriori*. Nous nous trouvons en présence de situations différentes qui ont pu toutefois être regroupées en deux catégories :

1. avant la pluie, le sol est à la capacité de rétention *sur toute la profondeur* ;

2. avant la pluie, l'humidité des couches superficielles est *inférieure* à la capacité de rétention. La réserve en eau du sol présente donc un *déficit*.

Dans le premier cas, il s'agira de la pénétration d'une pluie dans un sol uniformément humide et ressuyé. On peut s'attendre à ce que, dans ces conditions, la pluie transite dans le sol pour atteindre la « nappe » : c'est ce que nous avons cherché à vérifier en mesurant le niveau piézométrique. Dans le deuxième cas, il est vraisemblable que l'eau de pluie contribue, tout en s'infiltrant, à combler le déficit hydrique du sol. Dans les deux cas nous avons cherché à déterminer la vitesse de pénétration de l'eau dans le sol.

Dans une première partie, nous décrivons le site des observations et le protocole expérimental. Nous serons conduits à insister quelque peu (en Annexe) sur le tensiomètre car cet appareil n'est pas d'un usage encore répandu et son utilisation soulève quelques problèmes.

Dans la seconde partie nous analysons six événements. Les résultats sont ensuite regroupés et discutés.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET TECHNIQUE D'ÉTUDE

1. — Caractéristiques du sol étudié

Description du profil

Les observations ont été conduites sur un sol brun développé sur limons des plateaux d'une épaisseur de 2,3 m, reposant sur les marnes du Stampien. C'est une ancienne terre de culture située dans le Parc du Château de Versailles, à la pointe nord-est de la parcelle « Les Grands-Closeaux ». Le sol était maintenu sans végétation au moyen de désherbages chimiques pério-

diques. Il n'était jamais travaillé. L'emplacement sera dénommé Closeaux B, pour le différencier d'un emplacement voisin étudié au cours des deux années précédentes (cf. FEODOROFF, 1965).

Le profil pédologique se présente ainsi :

— 0 à 30-35 cm : horizon de surface, d'une couleur brune (un peu plus foncée de 0 à 10 cm), avec une structure polyédrique. Au changement d'horizon apparaissent des taches de rouille.

— 35-80 cm : limon brun clair et rougeâtre, structure à tendance polyédrique ;

— 80-130 cm : limon bigarré à structure continue ;

— 160-190 cm : limon bigarré jaune et gris ;

— 190-230 cm : limon jaunâtre, débris calcaires ;

— 230-270 cm : sable grossier limoneux calcaire à inclusions noires ;

— + 270 cm : marne bleue.

On est en présence d'un limon profond et homogène, ce qui est confirmé (tabl. 1) par l'analyse granulométrique (méthode DEMOLON et BASTISSE, 1934) et l'indice log 10 S de stabilité structurelle (méthode HÉNIN, 1958, appareil de FEODOROFF, 1960). La texture peut être dénommée limono-argileuse d'après le diagramme triangulaire de BÉTRÉMIEUX (1). La stabilité structurale est médiocre, surtout à la base du limon bigarré.

Densité apparente

Dans la mesure où nous chercherons ultérieurement à déterminer les teneurs en eau volumique, et à les rapporter à la saturation (porosité totale), nous avons tenté de mesurer avec le maximum de précision la densité apparente. Il est connu que ce genre de détermination donne des résultats assez éparpillés, mais on peut pallier cet inconvénient en procédant à un nombre de répétitions assez élevé (cf. par exemple MEDVEDEV, 1966).

La densité apparente a été mesurée à plusieurs reprises, dans des conditions de sol humide. Nous avons utilisé des cylindres de prélèvement d'un diamètre de 9,55 cm et d'une hauteur de 4 cm. Dans les couches jusqu'à 60 cm, trois mesures ont été faites en octobre 1964, et deux autres en novembre 1966, par tranches de 5 cm. Pour les tranches correspondant à l'emplacement des bougies de tensiomètres, nous avons cherché à préciser les résultats en effectuant un certain nombre de mesures complémentaires avec la sonde « Soilmoisture » pour prélèvement d'échantillons non remaniés (diamètre 5,4 cm, hauteur 3 cm). C'est également cet appareil qui a été utilisé ultérieurement (avril 1967) pour mesurer la densité apparente des horizons sous-jacents, rendus accessibles par le creusement d'une fosse (tabl. 1).

Porosité

Avec les données précédentes de densité apparente et celles de densité réelle mesurées au pycnomètre à air Beckman, nous avons calculé la porosité ; les résultats sont résumés dans le tableau 1.

On constate que :

— la porosité est très uniforme avec la profondeur et se situe aux alentours d'une valeur assez élevée : 50 p. 100. L'intervalle de confiance ne dépasse pas + 5 p. 100 (valeur absolue volumique) avec une probabilité de 95 p. 100. Il est de l'ordre de ± 2 dans la moitié des couches étudiées et notamment celles qui portent les tensiomètres.

II. — MESURES HYDROLOGIQUES EFFECTUÉES

Humidité du sol

Les profils hydriques étaient réalisés en prélevant la terre par tranches de 5 cm de 0 à 60 cm à l'aide d'une sonde de 20 mm de diamètre intérieur. Les échantillons étaient placés dans des boîtes hermétiquement fermées, puis pesés et passés à l'étuve à 105° pour déterminer leur teneur en eau. Ces prélèvements étaient effectués en quatre répétitions, une fois par semaine, à jour fixe.

Pour certains événements, nous avons pu déterminer le profil hydrique peu de temps après la pluie. Mais généralement c'est le profil hydrique hebdomadaire qui décrit la distribution de l'eau avant ou après la précipitation.

(1) Inédit, communication personnelle.

TABLEAU I

Caractéristiques du sol des Closeaux B

Horizon cm	Composition granulométrique en p. 100 de terre séchée à 105°						Stabilité structurale log 10 s	Densité apparente g/cm³	Densité réelle g/cm³	Porosité cm³/100cm³	Capacité de rétention cm³/100 cm³
	Matière organique	0 à 2 μ	2 à 20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0,2-2 mm					
0-5	2,6	18,9	22,7	37,7	9,5	8,7	1,97	1,20	2,72	55,9	27,6
5-10	2,5	18,6	22,4	39,4	10,1	7,0	1,95	1,33	2,72	51,1	29,5
10-15	2,6	20,2	21,8	30,9	11,7	9,1	1,93	1,32	2,72	51,5	28,7
15-20	2,5	20,9	23,2	33,9	11,7	7,8	1,92	1,35	2,72	50,3	27,6
20-25	2,6	20,5	22,8	32,9	13,1	8,1	1,94	1,39		48,9	28,3
25-30	2,1	21,9	24,4	31,7	13,1	6,8	1,65	1,39		48,9	28,0
30-35	1,4	19,9	23,6	39,4	11,6	4,1	1,57	1,39		48,9	28,0
35-40	0,6	19,2	22,7	47,8	6,8	2,9	1,91	1,36		50,0	27,7
40-45	0,7	18,9	21,3	44,9	11,6	2,6	1,78	1,38		49,3	27,1
45-50	1,2	21,4	24,4	38,0	10,9	4,1	1,84	1,46	2,73	46,5	28,6
50-55	0,7	22,0	22,9	43,1	9,7	1,6	1,97	1,40	2,75	49,1	26,8
55-60	0,7	22,9	23,9	42,1	9,0	1,4	1,81	1,52		44,7	28,7
60-80	0,8	21,9	23,7	43,8	7,7	2,1	1,70				
80-100	0,9	21,6	24,0	40,0	12,1	1,4	1,76	1,53	2,74	44,3	
100-120	0,6	20,3	24,4	41,7	11,7	1,3	1,74				
120-140	0,6	20,7	23,7	41,2	12,6	1,2	2,08				
140-160	0,6	17,9	25,2	43,6	11,4	1,3	2,24	1,58		42,4	
160-180	0,5	20,2	25,2	41,2	11,7	1,2	2,21	1,60	2,73	41,4	
180-190	0,5	24,4	26,3	37,1	9,8	1,9	1,93				
190-200	0,3	22,2	26,4	34,7	11,9	4,5	2,20	1,68	2,75	38,9	
200-220	0,2	22,8	28,5	37,8	9,7	1,0	2,17	1,72		37,5	
230-240	0,2	21,5	15,0	23,5	23,5	17,0	—				
270-290	0,3	63,5	8,0	11,5	9,0	8,0					

Capacité de rétention

Cette caractéristique a été déterminée d'après les mesures hydriques effectuées *in situ*. Suivant RODE (1965) nous avons considéré que le sol est à la capacité de rétention lorsque pendant de longues périodes (deux semaines à deux mois) l'humidité d'une couche donnée ne varie pratiquement pas.

Les résultats, exprimés en teneurs en eau volumique, figurent au tableau 1. On constate que la capacité de rétention du sol étudié est assez uniforme avec la profondeur. Par ailleurs, lorsque le sol se trouve à cette humidité, l'eau n'occupe qu'un peu plus de la moitié de la porosité totale.

La pluie

La pluie était mesurée sur place à l'aide de trois pluviomètres Agram placés à 40 cm de la surface du sol et distants de 2 m. Lectures quotidiennes complétées par les données du pluviographe de la Station centrale de Bioclimatologie. Ce dernier était situé à 500 m environ à vol d'oiseau de notre parcelle et il a été vérifié que la pluviométrie journalière est pratiquement identique dans les deux endroits.

Le niveau piézométrique

Le niveau piézométrique était mesuré quotidiennement dans un forage de 8 cm de diamètre et 180 cm de profondeur. Les parois du forage étaient nues. Seule la tranche voisine de la surface était protégée contre les éboulements par un tube en matière plastique de 30 cm de long, recouvert d'une boîte de conserve en guise de protection contre la pluie. Les mesures du niveau piézométrique n'ont commencé qu'après les premières pluies étudiées ici.

III. — MÉTHODE D'UTILISATION DES TENSIOMÈTRES POUR L'ÉTUDE DE L'INFILTRATION

a. — *Principes*

La méthode d'approche est basée sur un certain nombre d'hypothèses quant à la répartition de l'eau dans le sol pendant et après la pluie (fig. 1) :

1. Pendant la pluie on trouverait dans le sol un profil hydrique classique d'*infiltration* (de haut en bas zone intermédiaire ou zone de transmission, zone d'humectation, front) qui se raccorde au profil initial (antérieur à la pluie) au niveau du front. Une fois formé, ce profil se déplacerait par translation vers le bas. Un tel schéma théorique a été présenté par PHILIP (1957).

2. Lorsque la pluie cesse, le front continue à progresser et on assiste à la redistribution ou percolation de l'eau. La partie supérieure de la zone intermédiaire s'infléchit vers la gauche (pour atteindre l'humidité initiale). L'eau en déplacement affecterait, selon GARDNER (1964), l'allure d'une « vague ». Pendant la descente de cette « vague », sa longueur totale s'allonge mais son amplitude (distance entre le « sommet » et l'axe de l'humidité initiale) décroît. Des profils expérimentaux de ce type ont été donnés par NIELSEN et coll. (1964).

Un tensiomètre [1] placé sur le passage de l'eau devrait réagir de la façon représentée sur la figure 1 :

1. avant la pluie la tension est constante ;

2. lorsque le front atteint la coupelle poreuse du tensiomètre, la tension commence à baisser ;

3. tant que la teneur en eau s'accroît, la tension baisse. Elle atteint un minimum pour une valeur maximum d'humidité. Deux cas peuvent alors se présenter :

a) la pluie se prolonge. La teneur en eau se maintient à une valeur constante (zone intermédiaire ou zone de transition) et la tension se maintient à sa valeur minimum.

b) la pluie cesse (ou avait déjà cessé). Le passage du sommet de la vague est suivi par une décroissance de l'humidité et donc une croissance de la tension. Lorsque la « queue » de la vague est passée, l'humidité et la tension retrouvent leur valeur initiale.

Connaissant le moment où la pluie a commencé, on peut mesurer l'intervalle de temps Δt séparant le début de la pluie et la réaction du tensiomètre. On obtient ainsi une vitesse globale de pénétration de l'eau V :

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

où L est la distance entre la surface du sol et la coupelle du tensiomètre.

[1] On trouvera en annexe une description détaillée de l'appareil : principe, conditions et limites de l'emploi, etc.

Si la borne de droite de Δt est le moment où la tension commence à baisser (passage du front) on mesurera la vitesse moyenne du front V_F (caractérisé par Δt_F). De même, en prenant $\Delta t_{(S)}$ relatif au sommet de la vague, on mesure la vitesse V_s de ce dernier.

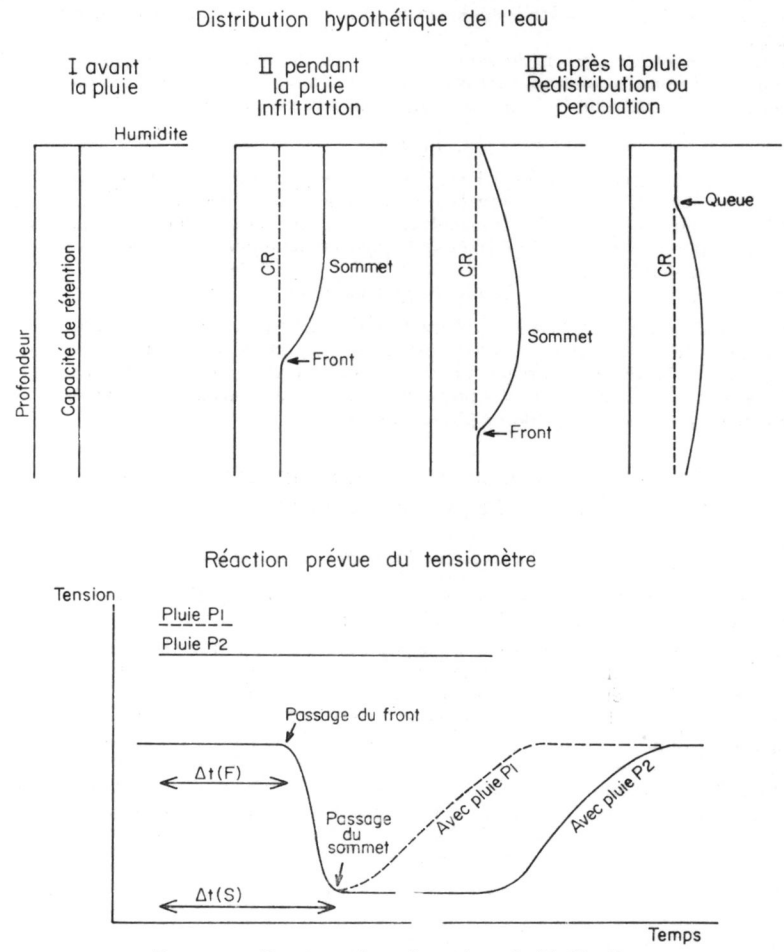


FIG. 1. — *Représentation schématique de l'infiltration*

On mesurera une vitesse d'*infiltration* si les intervalles $\Delta t_{(F)}$ ou $\Delta t_{(S)}$ sont *totalement couverts* par la durée T_p de la pluie ($T_p > \Delta t$). Dans le cas contraire où $T_p < \Delta t$ (illustré sur la figure par la pluie P_1), l'intervalle de temps Δt englobe une période d'infiltration suivie d'une période de percolation ou de redistribution. Dans ce cas, qui est le plus fréquent dans les conditions de nos mesures, la vitesse V est la résultante des deux phénomènes consécutifs.

Notons en outre que pour L on peut prendre la distance entre la surface et l'un ou l'autre tensiomètre, ou entre les deux tensiomètres, et calculer la vitesse pour des tranches différentes de sol.

b. — *Réalisation pratique des observations*

1. *Les profils hydriques* étaient réalisés hebdomadairement. — La pluie naturelle tombait ensuite à un moment imprévisible. Le profil hydrique antérieur est donc d'autant plus représentatif du profil « initial » que la pluie est tombée peu de temps après.

2. *Pose des tensiomètres et lectures.* — Au préalable les bougies sont saturées au laboratoire avec de l'eau dégazée par ébullition et maintenue sous vide. Les tensiomètres sont ensuite transportés sur le terrain, la bougie étant plongée dans de l'eau. Le zéro de l'échelle de lecture mobile est alors fixé au niveau du sommet de la colonne de mercure.

La pose des tensiomètres doit être réalisée de sorte que :

— la bougie poreuse soit en contact aussi intime que possible avec le sol environnant ,

— il n'y ait pas d'infiltration préférentielle le long de l'instrument.

Pour ce faire, nous avons opéré de la façon suivante :

Un trou d'un diamètre très légèrement inférieur à celui de la bougie a été perforé jusqu'à la profondeur requise. La terre recueillie dans les cinq derniers centimètres a été émiettée et réintroduite dans le trou, où on a ensuite versé de l'eau pour obtenir une boue (malaxation avec une baguette). Le tensiomètre a été poussé en force dans le trou, et la bougie s'est trouvée enrobée de boue. Le manomètre a alors indiqué une pression positive qui a baissé assez rapidement. Les lectures ont commencé le lendemain.

La pointe de la bougie d'un des instruments était à une profondeur de 30 cm, et le sommet de la partie poreuse à 25 cm. Le deuxième appareil mesurait dans la couche 45-50 cm.

On a cherché à assurer au mieux la verticalité de l'instrument. Ensuite, la partie aérienne a été arrimée par trois fils de fer. La terre a été tassée à l'émergence de la canne. La réglette et la colonne de mercure ont été orientées au nord, de façon à être protégées du soleil par le profilé.

La tension « avant la pluie » était donnée par les lectures quotidiennes (sauf samedi et dimanche) effectuées vers 13 heures (heure légale). Lorsqu'une pluie survenait, il s'agissait de resserrer les mesures, en allant le plus fréquemment possible sur le terrain, et autant que faire se peut pendant la pluie. Évidemment ces interventions (et donc la densité des mesures) étaient retardées ou réduites si la pluie survenait de nuit ou pendant des jours de congé, ce qui a été assez

TABLEAU 2

Tension de l'eau et température de l'air mesurées avant, pendant et après les averses étudiées

Date	Température (°C)	Tension mbar		Date	Température (°C)	Tension mbar	
		25-30	45-50			25-30	45-50
3 mai 65.....	20,8	66	109	15 juin 65	28,6	265	138
4 mai 65.....	19,2	70	110	16 juin 65	20,2	320	146
5 mai 65	17,8	16	37	17 juin 65	28,5	196	134
6 mai 65.....	16,9	28	47	18 juin 65	27,8	172	146
27 septembre 65 ..	22,0	160	135	6 août 65	27,2	511	312
28 septembre 65 ..	13,2	148	138	7 août 65	17,6	—	—
29 septembre 65 ..	18,9	30	128	8 août 65	25,6	—	—
30 septembre 65 ..	17,0	21	21	9 oût 65	25,3	42	60
1er octobre 65	18,7	34	42	10 août 65	27,4	46	78
2 octobre 65	18,8	—	—	11 août 65	29,3	80	100
3 octobre 65	21,0	—	—	12 août 65	28,5	96	115
4 octobre 65	24,0	52	69				
5 octobre 65	24,5	62	72	1er septembre 65 ..	20,3	658	278
				2 sept3mbre	14,4	668	287
26 mai 65.....	20,6	332	154	3 septembre 65 ..	14,7	22	272
27 mai 65.....	21,2	—	—	4 septembre 65 ..	17,5	—	—
28 mai 65.....	11,0	38	156	5 septembre 65 ..	17,2	—	—
29 mai 65.....	21,9	28	27	6 septembre 65 ..	18,0	30	42
30 mai 65.....	18,1	44	48	7 septembre 65 ..	21,5	22	34
31 mai 65.....	18,0	52	60				

Température maximale sous abri à 40 cm au-dessus d'un sol engazonné (données de la Station centrale de Bioclimatologie).

Tension mesurée aux deux profondeurs indiquées à 13 h, sauf 17 juin (12 h) et 18 juin (18 h).

fréquent. Cette circonstance a notamment empêché dans la plupart des cas, une détermination suffisamment précise du début de fléchissement de la tension, ce qui a rendu impossible le calcul de la vitesse du front.

c. — *Influence des caractéristiques* (1) *de l'appareil sur les résultats escomptés*

Les observations ont été conduites dans des conditions d'humidité telles que la rupture de la colonne d'eau n'est pas intervenue.

Pour étudier des phénomènes dynamiques il ne s'agissait pas de mesurer des états d'équilibre mais de suivre au plus près les mouvements de l'eau du sol. Il fallait notamment que l'appareil réponde rapidement à l'impulsion créée par le passage du front : le faible temps de réponse propre à l'appareil assurait certainement cette condition. Le deuxième élément important est le passage du sommet de la vague et l'estimation correspondante : comme à ce moment le sol est déjà assez fortement humide (au-dessus de la capacité de rétention) il est vraisemblable qu'il n'oppose pas de résistance au passage de l'eau vers l'appareil. Cette remarque s'applique à la phase consécutive de drainage, qui est en outre caractérisée par sa lenteur (quelques jours). Dans ces conditions il n'y a pas lieu de penser que les appareils nous fournissent des indications retardées ou sous-estimées.

L'influence de la température de l'air se trouve être sans effet gênant sur nos mesures, comme le montrent les données groupées au tableau 2. En effet, une pluie s'accompagne d'une baisse de température qui aurait pu entraîner une hausse corrélative de tension sur les deux appareils. Or on n'observe rien de tel, sinon des variations négligeables de quelques millibars sans commune mesure avec des variations dues manifestement au passage de l'eau.

Nous sommes donc fondés à penser que les appareils utilisés répondent à leur destination et que les résultats fournis sont fiables.

RÉSULTATS

I. — Description des événements

Nous allons décrire 6 événements caractérisés par une pluie notable. Ils seront regroupés en 2 catégories :

1. Pas de déficit hydrique dans le sol avant la pluie (toute l'épaisseur du sol est à la capacité de rétention).

2. Existence d'un déficit hydrique dans le sol avant la pluie. Cette dernière est, selon les cas, inférieure, égale ou supérieure au déficit.

Pour faciliter les comparaisons et l'interprétation, les profils hydriques sont donnés en *rétention relative*, c'est à dire que la teneur en eau est exprimée en p. 100 de la capacité de rétention.

A. — *Premier événement sans déficit hydrique dans le sol* (début mai 1965 (fig. 2))

Dates	3	4 et 5
Pluies mm	4,9	11,5

Profil hydrique le 4 mai : déficit nul aux erreurs près.

(1) Décrites en annexe.

Tension : chute dans les deux tensiomètres après la pluie du 4-5, survenue de nuit.

Vitesse de pénétration de l'eau : pour Δt, on prend l'intervalle entre le début de la pluie du 4 mai et l'obtention de la tension minima, soit $\Delta t = 20$. La pluie

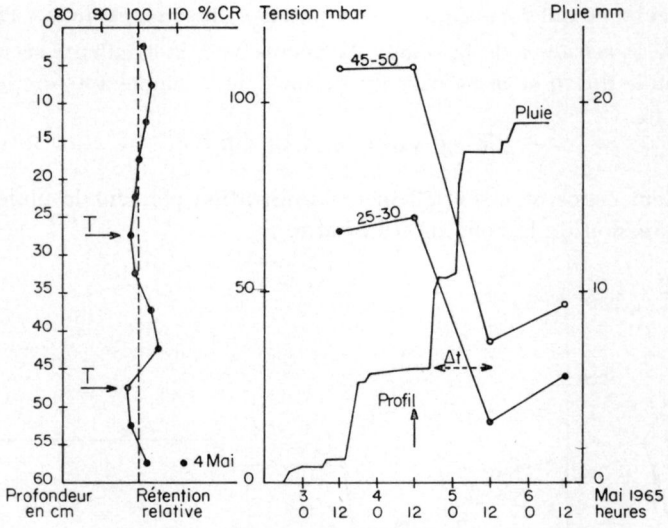


FIG. 2. — *Analyse de l'infiltration d'une averse*
Pas de déficit dans le sol

tombe pendant la majeure partie de cet intervalle : on mesure donc essentiellement une vitesse *d'infiltration* relative au « sommet de la vague ». On obtient :

Pour la tranche 0-25 V = 25/20 = 1,25 cm/h
Pour la tranche 0-45 V = 45/20 = 2,25 cm/h

Notons que pour la couche 45-50, la tension minimale vraie n'est peut-être pas encore atteinte, car la valeur lue (37 mbars) est relativement élevée. En effet, on trouve 16 mbars à 25 cm et dans les événements ultérieurs, elle descendra au voisinage de 20 mbars. Dans cette hypothèses Δt est sous-estimé et V = 2,25 cm/h est surestimé.

Nappe : pas de mesures.

B. — *Deuxième événement sans déficit hydrique dans le sol*
(fin septembre 1965 (fig. 3))

Dates	28	29 à 30 septembre	1er octobre
Pluies (mm)	6,8	24,9	3,3
Total	6,8	31,7	35,0

Profil hydrique effectué le 28 : dans la tranche 0-60 cm, le déficit est 2,4 mm soit pratiquement nul, compte tenu des erreurs de mesure.

Tension : le 28 septembre, la tension est stationnaire par rapport à la veille.

le 29 septembre : baisse de la tension à 25-30 cm, mais le minimum (21 mbars) n'est atteint que le lendemain ; la baisse du 29 est causée par la pluie de 6,8 mm. Cette pluie n'affecte pas la profondeur 45-50 où la tension ne fléchit pas le 29.

le 30 septembre : la tension passe par un *minimum* (21 mbars) aux deux profondeurs, ce qui correspondrait au passage du sommet de la vague.

Vitesse de pénétration de la pluie : Δt calculé avec la meilleure sécurité entre le début de la pluie du 29 et le passage du sommet de la vague à 45 cm le lendemain, soit $\Delta t = 21$ h.

$$V = 45/21 = 2{,}14 \text{ cm/h}$$

Cette valeur concerne essentiellement l'infiltration pendant la pluie et est relative à la progression de la zone intermédiaire.

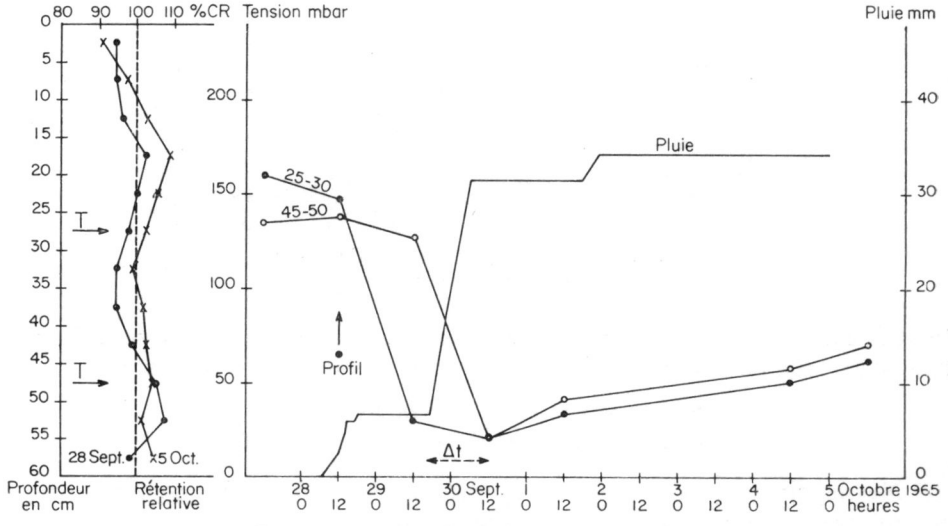


FIG. 3. — *Analyse de l'infiltration d'une averse*
Pas de déficit dans le sol

Drainage : après le passage du sommet de la vague, la tension remonte progressivement avec des valeurs sensiblement égales dans les deux horizons. Cinq jours après la pluie (le 5 octobre), la valeur de la tension a atteint environ la moitié de celle avant la pluie (70 pour 140). La teneur en eau est égale, aux erreurs près, à la capacité de rétention.

Nappe :

Dates	27	28	29	30	1	2	3	4	5
Profondeur (cm) .	159	160	160	141	122	–	–	124	126

On observe une remontée de la nappe le jour où la tension a baissé à 45-50 cm, ce qui laisse supposer qu'à ce niveau la tension a baissé plus tôt que le moment où a été effectuée la mesure, à moins qu'il ne s'agisse de l'effet de Tar Larsen.

On peut admettre que toute la pluie a percolé vers la nappe. Comme 35 mm de pluie font monter le niveau piézométrique de 35 cm environ, le taux de remplissage ou coefficient d'emmagasinement serait donc de 10 p. 100 du volume. A ce niveau, le volume total des vides (porosité) est 40 p. 100. Dans l'hypothèse où le sol est saturé au niveau de la nappe, la teneur en eau avant la pluie devrait donc être :

$$40 - 10 = 30 \text{ p. } 100,$$

soit vraisemblablement à la capacité de rétention.

C. — *Premier événement avec déficit hydrique dans le sol* (fin mai 1965 (fig. 4))

Dates	25	26	27	28	29	30	31 mai
Pluies (mm)	0	0,5	2,7	40,1	0	0	0

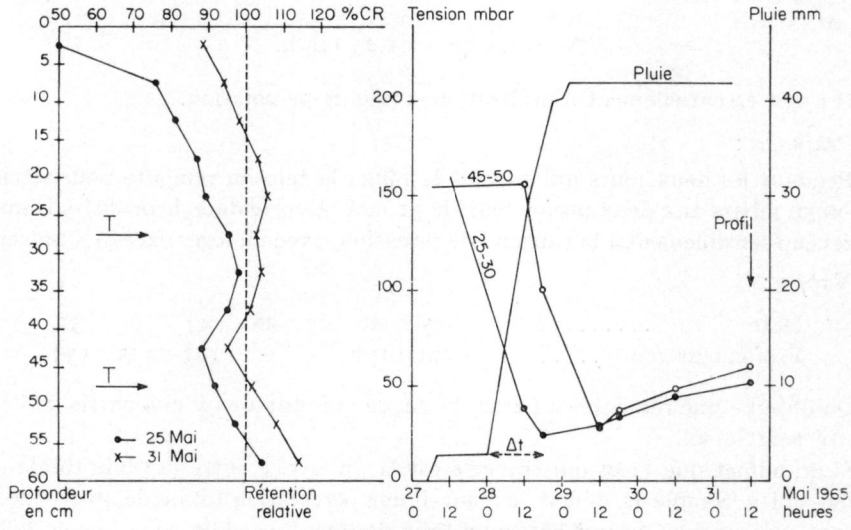


FIG. 4. — *Analyse de l'infiltration d'une averse*
Pluie supérieure au déficit du sol

Profil hydrique du 25 mai : déficit de 20,9 mm dans la couche 0-50 cm. On peut admettre que les pluies des 26 et 27 ont compensé l'accroissement de déficit du 25 au 28 et que ce profil caractérise la distribution de l'eau dans le sol avant la pluie du 28.

Tension : pendant la journée du 29, la tension baisse et passe par un minimum pour la profondeur 25 cm, mais on n'a pas pu déterminer le début de la baisse. Pour la profondeur 45-50, le début de la baisse de tension a pu être relativement bien situé dans le temps.

Le 30, la tension commence déjà à remonter à 25-30, alors qu'elle passe par le minimum pour l'appareil de profondeur.

Valeurs minimales de la tension : { à 25 cm ..... 24 mbars ; à 45 cm ..... 27 mbars

Vitesse de pénétration de l'eau :

— Entre la surface et 25 cm, Δt est compté entre le début de la pluie du 28 et le passage du sommet de la vague,

soit $\Delta t = 18h$

d'où $V = 25/18 = 1{,}39$ cm/h.

Comme Δt est compris pendant la pluie, on a mesuré une vitesse moyenne du sommet de la vague (zone intermédiaire) en infiltration.

— Entre la surface et 45 cm de profondeur :

— passage du front. Nous le situons entre les deux mesures de tension du 28, ce qui donne un Δt de 16 h

d'où $V = 45/16 = 2{,}82$ cm/h

Cette valeur concerne l'infiltration seule.

— passage du sommet de la vague situé pour la tension minima le 30. $\Delta t = 36$ h

$V = 45/36 = 1{,}25$ cm/h.

Il s'agit essentiellement d'infiltration suivie de percolation.

Drainage :

Pendant les deux jours qui suivent la pluie, la tension remonte pour atteindre environ 50 mbars aux deux profondeurs le 31 mai. A cette date, le profil hydrique est déjà revenu sensiblement à la capacité de rétention, avec un léger excès à 55-60 cm.

Nappe :

Date	25	26	27	28	29	30	31
Profondeur (cm)	171	170	–	–	143	135	133

On observe une remontée à partir du 28, ce qui indique qu'une partie de l'eau a traversé tout le sol.

Si on admet que l'eau qui traverse est la différence entre la pluie totale et sa fraction qui a comblé le déficit, on aurait une percolation totale de 40,1 — 20,9 = 19,2 mm, soit environ 20 mm. Avec un taux de remplissage de 10 p. 100 en volume (calculé sur l'événement du 29 septembre), un tel apport d'eau devrait conduire à une remontée de la nappe de 20 cm. La remontée réelle est plus importante : 170 — 133 = 37 cm. Ce résultat laisse supposer qu'avant la pluie du 28 mai, la couche de sol entre 60 et 170 cm de profondeur avait une teneur en eau supérieure à la capacité de rétention, et donc une macroporosité disponible réduite. Cette interprétation est vraisemblable étant donné l'époque : sortie de l'hiver ; on manque toutefois d'informations complémentaires pour la confirmer. Une autre interprétation possible est qu'au niveau de la nappe le sol n'est pas saturé.

D. — *Deuxième événement avec déficit hydrique dans le sol* (mi-juin 1965 (fig. 5))

Dates	14	15	16	17
Pluies (mm)	0	0	21,5	0,1

Le profil hydrique a été déterminé le 15 juin, c'est-à-dire la veille de la pluie. On peut admettre qu'il reflète assez bien, en le sous-estimant peut-être un peu, le déficit réel au moment de la pluie du 16. Ce déficit mesuré est de 19,9 cm. Sa valeur est pratiquement *égale* à la hauteur de la pluie. On remarque en outre que le déficit s'annule à la profondeur exacte (45-50) où est situé le deuxième tensiomètre.

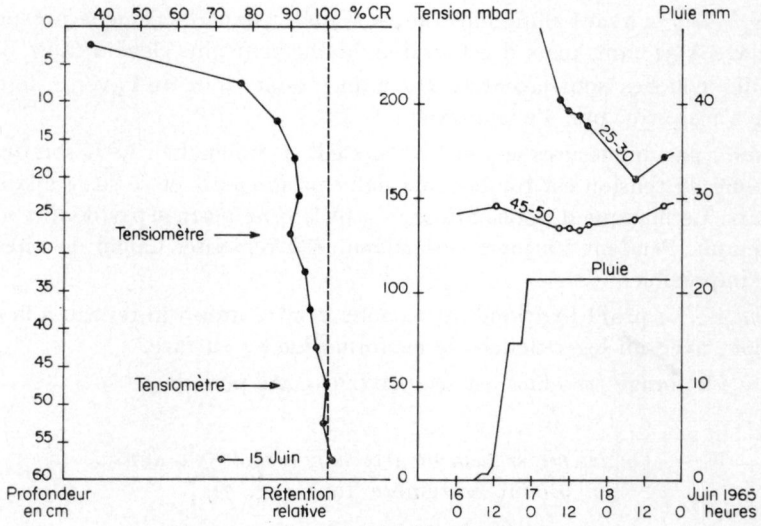


FIG. 5. — *Analyse de l'infiltration d'une averse*
Pluie égale au déficit du sol

La tension décroît dans l'appareil de surface et passe de 320 mbars la veille à un minimum de 160 mbars : cette valeur relativement élevée correspond vraisemblablement à la réhumectation jusqu'à la valeur de la capacité de rétention, sans manifestation d'excès par rapport à cette valeur.

Le fait important est que le deuxième tensiomètre (45-50) ne réagit pas du tout à cette averse. Tout se passe comme si l'eau de pluie n'a pas atteint cette profondeur. Cette observation laisse également à penser que ce tensiomètre n'a pas été sensible à un accroissement éventuel de la pression de l'air du sol.

La vitesse de pénétration peut-être calculée pour la couche 0-25. Le sommet de la vague passe 45 h après le début de la pluie ($\Delta t = 45$ h). La borne supérieure de Δt étant très postérieure à la fin de la pluie, la vitesse calculée est essentiellement relative au processus de *redistribution*. On trouve la valeur suivante :

$$V = 25/45 = 0{,}56 \text{ cm/h}$$

Nappe :

Dates	14	15	16	17	18
Profondeur (cm)	165	166	167	169	170

La pluie étudiée n'atteint donc pas la nappe qui continue à baisser.

E. — *Troisième événement avec déficit hydrique dans le sol*
(mi-août 1965 (fig. 6))

Dates	3	4	5	6	7	8	9	10
Pluies (mm)	0,1	0	0	1	47,6	0,5	0	0

Profil hydrique avant pluie effectué le 3 août : dans la tranche prospectée, le déficit s'élève à 31 mm, mais il est vraisemblablement plus élevé à cause du dessèchement des couches sous-jacentes. Du 3 au 7 août, jour de l'averse, le déficit a encore dû s'accroître par l'évaporation.

Tension : pas de mesures le 7 et le 8 (samedi et dimanche). Le 9, soit deux jours après la pluie, la tension est tombée aux deux profondeurs et se situe aux environs de 50 mbars. Le manque d'informations le 7 et le 8 ne permet pas de dire s'il s'agit d'un minimum. Pendant les jours qui suivent elle remonte. Calcul de vitesse d'infiltration impossible.

Drainage : Le profil hydrique du 10 août montre un profil revenu à la capacité de rétention, avec un léger déficit de néoformation en surface.

Nappe : le forage (180 cm) est sec pendant cette période.

F. — *Quatrième événement avec déficit hydrique dans le sol*
(début septembre 1965 (fig. 7))

Cet événement est plus complexe que les précédents, car il comporte une succession de pluies.

Dates	1	2	3	4	5	6	7
Pluie (mm)	1,8	19,6	19,6	3,2	6,7	5,6	0,7
Total	1,8	21,4	41	44,2	50,9	56,5	57,2

Profil hydrique effectué le 31 août : il montre un déficit affectant toute la profondeur étudiée et continuant peut-être en dessous. Par tranches de sol, ce déficit se décompose ainsi :

Profondeur (cm)	Déficit (mm)
—	—
0-30	20,2
30-50	8,1
0-50	28,3
0-60	30,1

Compte tenu de la pluie du 1er septembre, on peut admettre que le 2, avant l'averse de 19,6 mm, le déficit était de l'ordre de 17-18 mm dans la couche 0-30 et 26,5 mm dans la couche 0-50.

Tension : à la suite de l'averse du 2, le tensiomètre à 25-30 réagit alors que l'appareil plus profond ne réagit pas. Cela laisse entendre que la pluie a atteint, mais guère dépassé la profondeur 30 cm. Elle a donc comblé le déficit jusqu'à ce niveau.

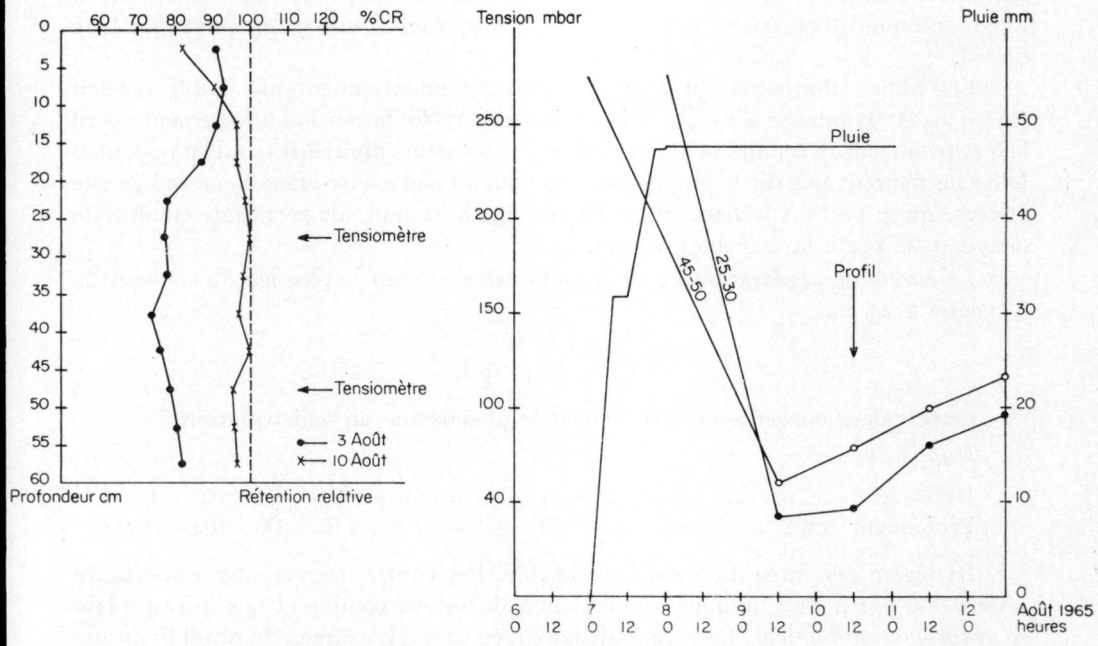


FIG. 6. — *Analyse de l'infiltration d'une averse*
Pluie supérieure au déficit du sol

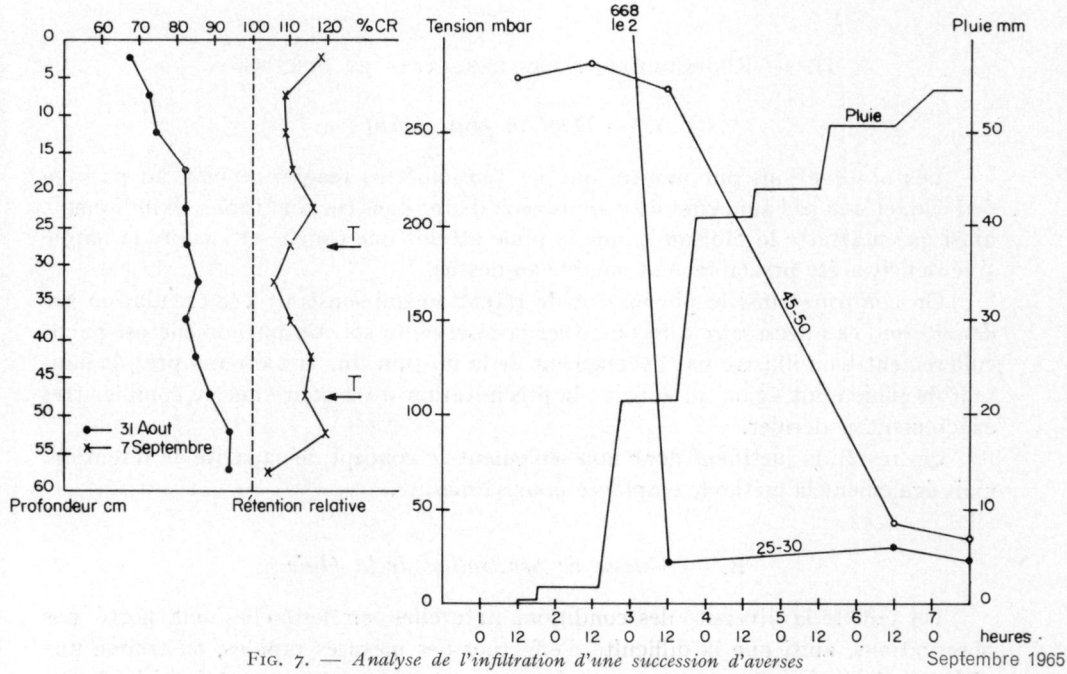


FIG. 7. — *Analyse de l'infiltration d'une succession d'averses*

La valeur minimale de tension est 22 mbars. La non-réaction du tensiomètre à 45-50 indique qu'en outre, cet appareil n'a pas réagi à une compression de l'air du sol.

Les pluies ultérieures du 3 au 7 septembre maintiennent une faible tension (entre 20 et 30 mbars) à 25-30. A la profondeur 45-50, la tension a fortement décrû le 6 et passe par un minimum (34 mbars) le 7 ; les valeurs ultérieures sont en remontée (elles ne figurent pas sur le graphique). On pouvait s'attendre effectivement à ce que l'averse du 3, portant la hauteur totale de pluie à 41 mm, ait permis de combler le déficit dans toute la tranche 0-60 cm.

La vitesse de pénétration de l'eau a été calculée pour le passage du sommet de la vague à 25 cm.

$$\Delta t = 22 \text{ h}$$
$$V = 1{,}14 \text{ cm/h}$$

Cette valeur concerne essentiellement le phénomène de redistribution.

Nappe :

Dates	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Profondeur (cm)	209	209	206	–	–	178	176	166	164	162

La légère remontée du 3 est inexplicable. Par contre, la remontée importante observée à partir du 6 indique que le déficit du sol est comblé et que le trop plein se déverse en profondeur. Le 7, ce drainage est en cours. L'examen du profil hydrique de ce jour montre qu'il y a encore de l'eau en excès dans les 60 premiers centimètres du sol. Ce profil hydrique correspond d'ailleurs à la *plus forte teneur en eau* rencontrée dans ce sol après la pluie.

II. — Regroupement des résultats et discussion

A. — *Relation pluie-déficit*

Les observations ont montré que les tensiomètres réagissent bien au passage de l'eau, et non pas à un effet de compression d'air ; dans ces conditions, ils indiquent, ainsi qu'en atteste le tableau 3, que la pluie atteint une couche et ensuite la nappe si le déficit a été préalablement comblé au-dessus.

On confirme ainsi le phénomène de rétention qui soustrait à la circulation *per descensum* l'eau nécessaire à reconstituer la réserve du sol. Ce phénomène est particulièrement bien illustré par l'événement de la mi-juin où, aux erreurs près, la hauteur de pluie était égale au déficit : la précipitation a eu pour effet de combler très exactement ce dernier.

Ces résultats justifient donc non seulement le concept de capacité de rétention, mais également la méthode employée pour sa mesure.

B. — *Vitesse de pénétration de la pluie*

Du fait de la diversité des conditions naturelles sur lesquelles ont porté nos observations, ainsi que la difficulté d'effectuer des mesures rapides, on trouve une série de résultats qui ne sont pas toujours comparables entre eux (cf. tabl. 4). Ces

résultats portent sur le déplacement de la zone intermédiaire (zone de transmission) ou du sommet de la vague.

D'un événement à l'autre, on retrouve le même ordre de 1 à 2 cm/h. Il est fort

TABLEAU 3

Pénétration de l'eau suivant la relation pluie-déficit

Date	Déficit (mm)	Pluie (mm)	Réaction tensiomètre		Remontée de la nappe
			dans zone à déficit	dans zone sans déficit	
Début mai 65...	0	11,5	—	oui	Pas de mesures
Fin mai 65	20,9	40,1	oui	oui	oui
Mi-juin 65	19,9	21,5	oui	non	non
Mi-août 65	> 31	47,6	oui	—	oui
Début sept. 65 .	26,5	19,6	oui (1)	—	—
	26,5	39	oui	—	oui
Fin sept. 65	0	6,8	—	oui (1)	—
	0	24,9	—	oui	oui

(1) A la profondeur 25-30 cm seulement.

TABLEAU 4

Vitesse de pénétration de la pluie

Date	Déficit dans le sol avant la pluie	Vitesse de pénétration de l'eau dans le sol (cm/heure)		
		Profondeur considérée (cm)	Infiltration dominante	Percolation ou redistribution dominante
Début mai 65	non	0-25	1,25	—
		0-45		< 2,25 (P)
Fin mai 65	oui	0-25	1,39	
	oui	0-45	1,25	
			2,82 (1)	
Mi-juin 65	oui	0-25		0,56 (R)
Début septembre 65 .	oui	0-25		1,14 (R)
Fin septembre 65 ...	non	0-45	2,14	

(1) Seule valeur relative au passage du front.

possible que la plupart de ces valeurs soient *sous-estimées*, dans la mesure où le moment exact du passage du « sommet de la vague » (tension minima) n'a pu être mieux précisé dans les conditions de nos observations. Ces valeurs entrent dans la classe moyenne de DONAHUE (1964), comprise entre 1,27 et 2,54 cm/h.

C. — *Humidité du sol en cours d'infiltration*

Différents travaux sur modèle de laboratoire (RUBIN, 1964 ; FEODOROFF, 1965) ont montré que l'humidité en cours d'infiltration dans un sol initialement sec dépend du matériau étudié et de l'intensité de la pluie. Une estimation de cette humidité h est donnée par

$$h = h_0 + \frac{100\ I}{V} \qquad (1)$$

où h_0 est l'humidité initiale p. 100 volumique
I intensité d'arrosage
V vitesse de front.

La transposition de ces résultats au terrain n'a pas encore été tentée, et la présente étude permet d'esquisser une méthodologie et une ébauche de réponse quantitative. Nous disposons en effet d'informations sur l'humidité initiale du sol, sur la pluie et sur la vitesse d'avancement non pas du front mais de la zone de transmission grâce aux tensiomètres. Ainsi la relation (1) n'est plus approchée et devient rigoureuse.

Lorsque le sol ne présente pas de déficit avant la pluie, l'humidité initiale h_0 est la capacité de rétention.

Lorsqu'un déficit D existe, et qu'il est notablement inférieur à la hauteur P de la précipitation, nous ne considérerons que l'infiltration de la pluie « disponible » [1] $P_d = P - D$. Le déficit étant ainsi considéré comme comblé préalablement à l'infiltration de P_d, l'humidité initiale serait également la capacité de rétention.

Revenons à l'expression (1) pour remarquer que

$$\frac{I}{V} = \frac{P/T_p}{L/T_i} \qquad (2)$$

où L est une distance, en l'occurence celle séparant la surface du sol et la bougie du tensiomètre
T_p durée de la pluie
T_i durée de l'infiltration jusqu'à la profondeur L.

D'une façon générale la relation (1) s'applique si $T_i < T_p$, c'est-à-dire si la réaction du tensiomètre est antérieure à la fin de la pluie. Parmi les événements étudiés, et compte tenu des contraintes de mesure, un seul répond approximativement à cette condition (30 septembre 65). Par ailleurs, et pour les mêmes raisons expérimentales, T_i est surestimé.

Remarquons enfin que si la condition $T_i < T_p$ est réalisée, on peut considérer une pluie fictive partielle P_p qui se serait arrêtée lorsque le tensiomètre réagit.

Sa hauteur serait alors comme

$$P_p = \frac{P \times T_i}{T_p} \qquad (3)$$

[1] Équivalent de la pluie utile ou efficace des hydrogéologues.

TABLEAU 5

Remplissage du sol en cours d'infiltration
(Estimations moyennes pour la tranche 0-45 cm)

Date	Déficit hydrique (D mm)	Pluie			Taux de remplissage (cc/100 cc)		Humidité initiale cc/100 cc	Humidité totale en infiltration (cc/100 cc)		Porosité cc/100 cc
		Totale (P mm)	disponible (P-D mm)	Intensité (mm/h)	$\frac{100\ I}{V}$	$\frac{P-D}{L}$		Calculée	Mesurée	
2 sept.	5,8 (1)	29,5	23,7			5,3	28,1	33,4	31,3	50,5
3-4-5 sept.										
6 sept.										
7 sept.										
30 sept.	0	31,7	31,7	1,78	8,3		28,1	36,4	—	50,5

(1) D = 25,4 le 2 moins P = 19,6 le 2.

En portant (3) dans la relation (2) il vient l'expression simplifiée.

$$\frac{I}{V} = \frac{P_p}{L} \qquad (4)$$

qui est plus commode et plus précise que (2). Nous l'avons utilisée pour la succession de pluies du début septembre 65.

Les quelques résultats ainsi obtenus figurent au tableau 5. Les conclusions provisoires sont les suivantes :

— la valeur du taux de remplissage est faible. Les plus fortes humidités en cours d'infiltration seraient plus proches de la capacité de rétention que de la saturation. En effet la macroporosité est égale à 50,5 — 28,1 = 22,4 cm³/100 cm³. Avec la plus forte pluie (30 septembre) l'eau en mouvement n'occupe qu'un tiers de ce volume (8,3/22,4). Le résultat n'est pas sans rappeler les observations de GUYON (1965) qui a montré que, dans un sol de limon analogue, la porosité de libre écoulement (μ) ne concerne qu'une fraction de la macroporosité.

Nous ne disposons pas de vérification expérimentale directe. Toutefois, le profil hydrique du 7 septembre réalisé un jour après la pluie (alors que la tension se maintient à une valeur minimale) nous confirme la validité des ordres de grandeur obtenus.

Un comportement voisin se manifeste vraisemblablement au cours des autres averses. Nous n'avons pas pu réaliser les calculs par les relations (2) ou (4) mais les tensions minimales mesurées sont assez groupées :

TABLEAU 6

Tension minimale (mbars) *en cours d'infiltration*

Profondeur	25-30 cm	45-50 cm
Début mai 65	16	37
Fin mai	24	24
Mi-juin	160	pas de réaction
Début septembre	22	34
Fin septembre	21	21

L'événement de la mi-juin est exceptionnel, car la pluie est égale au déficit du sol, et la teneur en eau n'a vraisemblablement pas dépassé la capacité de rétention, d'où la valeur élevée de la tension « minimale ».

Dans les autres cas, nous trouvons le même ordre de grandeur que le 7 septembre, ce qui laisse supposer de nouveau que l'humidité correspondante ne dépasse que de fort peu la capacité de rétention.

D. — *Drainage après la pluie*

Ce remplissage maximum ne se maintient que si de nouvelles pluies surviennent, comme en début septembre. Sinon, on assiste au drainage qui s'accompagne de la

remontée de la tension et de la baisse d'humidité au niveau considéré, le phénomène s'achevant avec le retour à la capacité de rétention. La durée en est variable.

TABLEAU 7

Ressuyage après les averses

Date	Pluie (mm)	Retour à la capacité de rétention		
		Nombre de jours	Tension finale mbars à 25-30	à 45-50
Fin mai	40,1	3	52	60
Mi-août	47,6	3	46	78
Fin septembre ...	35	6	62	72

Remarquons que les valeurs de tension obtenues après drainage sont assez groupées entre 50 et 80 mbars. Nous avons observé par ailleurs que si un dessèchement superficiel survient ensuite, la tension s'élève considérablement, surtout dans la couche 25-30, alors que la teneur en eau ne se modifie pratiquement pas.

Au cours de ces phases de drainage, *le gradient de tension* entre les deux appareils est pratiquement nul au cours d'un certain nombre d'événements. Il en est ainsi fin mai, début septembre et fin septembre (cf. figures). On peut en conclure que l'écoulement de l'eau vers la profondeur est essentiellement gravitaire. Toutefois, un gradient tourné vers le bas (tension plus élevée à 45-50 qu'à 25-30) s'observe début mai et mi-août. Dans ce dernier cas, la succion du sous-sol sec intervient probablement dans la redistribution.

CONCLUSION

Au cours de l'étude de ces averses, nous avons montré que seule la fraction de pluie qui n'est pas utilisée à recombler la réserve du sol poursuit sa progression en profondeur. Cette progression s'effectue avec une vitesse notable, de 25 à 60 cm/jour. Par ailleurs le passage de la « vague » d'infiltration n'entraîne qu'une faible remontée de la teneur en eau. La valeur maximale s'écarte peu de la capacité de rétention. Une telle conclusion n'est cependant applicable qu'au milieu étudié, où la macroporosité est très importante, ce qui facilite probablement les transferts de l'eau, au même titre que l'uniformité du profil suivant la profondeur.

Sur le plan de la méthode, l'utilisation des tensiomètres permet de dire si une pluie atteint, ou n'atteint pas, une profondeur donnée et rend possible le calcul d'une vitesse d'infiltration et d'un taux de remplissage. Les résultats obtenus donnent déjà des ordres de grandeur acceptables. Une meilleure précision pourrait être obtenue en enregistrant les tensions. Un réseau plus dense de mesures, dans le temps et dans

l'espace, permettra en outre de préciser l'influence sur l'infiltration *in situ* de facteurs tels que les paramètres de la pluie (hauteur, intensité, durée) ou les conditions d'humidité initiale du sol.

Reçu pour publication en juin 1969.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié de l'appui et des conseils de S. HÉNIN, Directeur de la Station centrale d'Agronomie et de son adjoint R. BÉTRÉMIEUX. Des remarques utiles ont été également faites par M. ROBELIN.

Par ailleurs de nombreuses discussions nous ont été profitables, notamment celles avec P. MANTION et R. DEGALLIER.

Certaines phases de ce travail ont reçu un apport financier et intellectuel d'une convention D. G. R. S. T.

Que tous ceux qui nous ont aidés à des titres divers, même s'ils ne sont pas nommément désignés, trouvent ici l'expression de notre gratitude.

SUMMARY

A STUDY OF THE RAIN INFILTRATION IN FIELD CONDITIONS BY MEANS OF TENSIOMETERS

The study relates to the analysis of the infiltration of six natural rainfalls in a field soil. With the aid of tensiometers it is possible to follow the movements of water below the soil surface.

In the first part we describe the soil under study and the systematic measurements that were taken. The methodology for using the tensiometer is then presented as well as the practical carrying out of the measurements.

The second part deals with the results obtained. The tensiometer indicates whether or not the water has infiltrated to any given depth. The observations make it possible to verify that, should the amount of rain P be less than the water deficit D of the soil, the precipitation is retained in the surface layers. If P > D the excess drains down towards the water table. In this case it is possible, with the aid of tensiometers, to calculate the velocity of infiltration and the rate of saturation of the soil, and to follow the course of the drainage after rain.

A detailed description of the tensiometer is given in an appendix : the princips, limits of use and effects of external factors.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER REGENVERSICKERUNG « IN SITU » MITTELS TENSIOMETERN

Es handelt sich in dieser Untersuchung um die Analyse der Versickerung von sechs naturellen Platzgreen in einem der natürlichen Austrocknung ausgesetzten Boden. Die Tensiometer erlauben die Wasserbewegung in der Tiefe zu verfolgen.

In einem ersten Teil wird das untersuchte Gelände beschrieben sowie die durchgeführten systematischen Messungen. Die Methodologie der Anwendung des Tensiometers und die praktische Verwirklichung der Messungen werden alsdann dargelegt.

Im zweiten Teil werden die erzielten Ergebnisse besprochen. Das Tensiometer zeigt an, ob das Sickerungswasser eine bestimmte Tiefe erreicht oder nicht. Dank der Messungen ist es also

möglich zu prüfen, ob wenn die Regenshöhe P niedriger ist als das hydrolytische Defizit D des Bodens, die Niederschlagsmenge in den oberen Schichten zurückgehalten wird. Im Falle P > D fliesst der Ueberschuss in der Richtung des Grundwasserspiegels ab. Mit Hilfe der Tensiometer kann man dann die Versickerungsgeschwindigkeit und den Prozentsatz der Anfüllung des Bodens durch das Wasser berechnen, sowie die durch den Regen ausgeübte Dränierung beobachten.

In einer Anlage werden die Tensiometer ausführlich beschrieben : ihr Prinzip, Grenzen der Verwendung, Einfluss der äusserer Faktoren.

РЕЗЮМЕ

Изучение инфильтрации дождевой воды in situ при помощи тенсиометров.

А. ФЕОДОРОВ, Ж. Л. БАЛЛИФ.

Данная работа представляет анализ просачивалия шести ливней в полевых условиях. Движение воды вглубь наблюдалось при помощи тенсиометров.

В первой части описываются изучавшийся участок и проведенные систематические измерения. Затем следуют методика применения тенсиометра и описание практического выполнения измерений.

Во второй части обсуждаются полученные результаты. Тенсиометр указывает достигла-ли инфильтрационная вода данную глубину. Наблюдения позволяют, значит, проверить что выпавшие осадки задерживаются в поверхностных слоях почвы, в случаях, когда высота этих осадков P не достигает величины дефицита влажности D почвы. Если P > D - излишек влаги просачивается к грунтовым водам. Таким образом, при помощи тенсиометра возможно рассчитать скорость инфильтрации, степень заполнения почвы водой и наблюдать последующее стекание.

В приложении дается подробное описание тенсиометров : принцип, ограничения применения, влияние внешних факторов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLARD R., 1963. *Le système international de mesures.* Paris. Gauthier Villars Ed.

DEMOLON A., BASTISSE E., 1934. Sur la dispersion des colloïdes argileux. Application à leur extraction. *C. R. de la Conférence de la première Commission de l'Association Internationale de la Science du Sol,* Versailles, p. 47 et *Ann. agron.*, nouvelle série, **5**, 1935.

DONAHUE R. L., 1964. *Nature des sols et croissance végétale.* Intercontinental Éd., New York.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol (Indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **6**, 651-659.

FEODOROFF A., 1965. *Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante.* Thèse, Paris.

GARDNER W. R., 1964. Water movement below the root zone. *C. R. VIIIe Congrès A.I.S.S.*, Bucarest **1**, 63-66.

GARDNER R., 1965. Relation of temperature to moisture tension of soil. *Soil Sci.*, **79**, 4, 257-265.

GESLIN H., 1934. La température du sol. *C. R. Ire Comm. A.I.S.S.*, Versailles.

GUYON G., 1965. *Considération sur l'hydraulique du drainage des nappes.* Thèse, Toulouse.

HAISE H. R., KELLEY O. J., 1950. Causes of diurnal fluctuations of tensiometers, *Soil Sci.*, **70**, 301-313.

HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS, 1955. 1 vol., Cleveland.

HÉNIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **1**, 73-92.

KORNEFF G., 1922. Force de succion du sol. *Journal Agric. exp.* (en russe), **22**, 105-111., St-Petersbourg.

MANTION P., 1968. Sur différentes techniques d'extraction de l'eau du sol. Rapport interne.

MATHIEU G., 1932. *Contribution à l'étude de quelques rapports entre l'eau, le sol et la plante.* Thèse, Clermont-Ferrand.

PHILIP R. J., 1957. The theory of infiltration. The influence of initial moisture content. *Soil Sci.*, **84**, 3, 257-268.

RICHARDS L. A., WILLARD-GARDNER, 1936. Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water. *J. Amer. Soc. Agron.*, 352-358.

RICHARDS S. J., 1965. Soil suction measurement with tensiometers dans *Methods of soil analysis*, Part 1, ASA, Madison.

RODE A. A., 1965. *Les fondements de la connaissance sur l'eau du sol.* 1 vol. (en russe), Leningrad.

RUBIN J. et *al.*, 1964. Soil water relations during rain infiltration. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 1, 1-5.

TAYLOR S. A., EVANS D. D., KEMPER W. D., 1961. Evaluating soil water. *Utah St. Univ. Bull.*, n° 426.

ANNEXE

LE TENSIOMÈTRE — L'APPAREIL ET SON UTILISATION

Le tensiomètre est un manomètre destiné à mesurer la pression de succion de l'eau du sol.

A. — *Principe*

Une goutte d'eau posée sur un sol sec est rapidement absorbée. Si le matériau communique avec de l'eau libre par l'intermédiaire d'un filtre poreux (par ex. bougie en porcelaine), il absorbe l'eau à travers le filtre. KORNEFF (1922) utilise ce principe pour évaluer la « force de succion » du sol en plaçant un manomètre à mercure au-dessus du récipient d'eau libre et en mesurant la dépression d'air créée par le départ de l'eau. La mise au point définitive du tensiomètre [1] est due à MATHIEU (1932) qui décrit, dans un mémoire remarquable et encore à jour, un appareil où la colonne d'eau surmontant la bougie poreuse est directement raccordée à un manomètre à mercure en U. Tous les appareils actuels dérivent de celui de MATHIEU.

Dans un système en équilibre (fig. 8) le manomètre exprime un abaissement de pression par rapport à la pression atmosphérique. Par convention un système à deux phases sol-eau (sol saturé) a une succion nulle, et il est assimilé à de l'eau pure (une phase). Par conséquent on prend pour zéro de référence (zéro instrumental) la lecture du manomètre lorsque la bougie est recouverte d'eau.

Une correction du zéro du tensiomètre est donc nécessaire avec le dispositif *vertical*, où le système de mesure et le système mesuré ne sont pas au même niveau.

Dans l'hypothèse d'une analogie capillaire, la pression négative lue sur le tensiomètre est assimilée à la pression négative de Laplace.

$$P = \frac{2A}{R}$$

où A est la tension superficielle du liquide (MT^{-2})
R le rayon moyen de courbure du ménisque (L)

Dans ce qui suit, nous allons considérer la *grandeur positive mesurée*, qui sera appelée *tension*, de même valeur absolue que la pression de succion du sol pour l'eau. Elle sera exprimée en millibars. La correspondance avec d'autres unités usuelles est donnée dans le tableau 8.

B. — *Les tensiomètres utilisés*

Nous avons utilisé pour nos mesures en plein champ deux tensiomètres de fabrication américaine « Soil Moisture » (référence 2600 modèle P) fabriqués commercialement selon le principe du tensiomètre vertical à cuve de mercure.

[1] Le terme de tension tend à remplacer « force de succion » ou « pression de succion ». Il est consacré par l'appellation de l'appareil de mesure due à RICHARDS et GARDNER (1936).

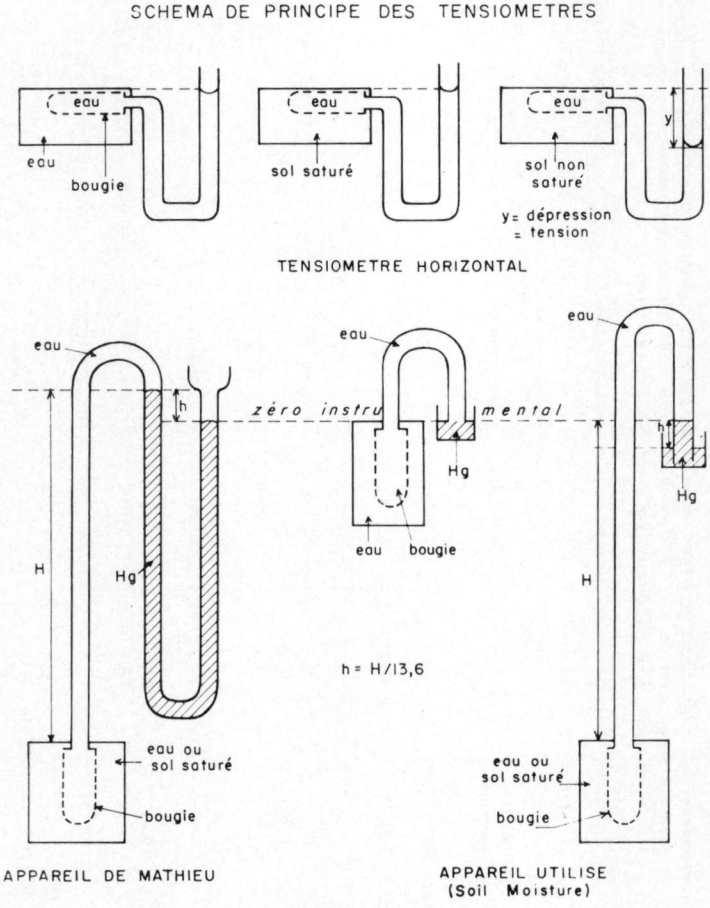


FIG. 8. — *Schéma de principe des tensiomètres*

TABLEAU 8

Correspondance des expressions et unités usuelles de potentiel capillaire (matriciel), *ou pression de succion du sol, ou tension de l'eau dans un sol non saturé* d'après S. A. TAYLOR (1961) et R. ALLARD (1963)

Pression statique ou contrainte						Énergie ou travail (1)		pF Logarithme à base 10 de la pression cm-eau (2)
centimètres d'eau	kilogramme par centimètre carré	millimètres de mercure	pascals	millibars	atmosphères	ergs par gramme masse	joules par kilogramme masse	
cm eau	kg/cm^2	mm Hg ou Torr	Pa	m bar	atm	erg/g	J/kg	
L	$L^{-1}MT^{-2}$	L	$L^{-1}MT^{-2}$	$L^{-1}MT^{-2}$		$L^2\ T^{-2}$	$L^2\ T^{-2}$	
0	0	0	0	0	0	0	0	x
1	0,001	0,735	98,07	0,98	—	980,67	—	0
100	0,1	73,5	—	98,07	—	—	—	2
1 000	1	735	—	980,67	—	—	98,07	3
1 033	1,033	760	—	1 013	1	—	101,33	$\simeq$ 3
1 019	1,019	750	—	1 000	0,987	—	—	$\simeq$ 3
1,36	—	1	—	1,33	—	—	—	—
1,019	—	0,75	100	1	—	1 000	0,1	$\simeq$ 0
10,19	—	7,5	1 000	10	—	10 000	1	$\simeq$ 1

(1) par unité de masse d'eau.
(2) conformément à la définition de SCHOFIELD (1935).

La bougie (50 mm de long, 22 mm de diamètre) est raccordée à une canne plastique rigide de même diamètre extérieur avec un diamètre intérieur de 7-8 mm environ. Au sommet de la canne se trouve un bouchon de remplissage et de purge. A quelques centimètres sous ce bouchon, la canne se raccorde à un tube en cuivre, diamètre intérieur 1,5 mm environ, long de 80 cm, qui réalise la branche ascendante du U retourné. La branche descendante est constituée par un tube en verre de 2 mm de diamètre intérieur qui plonge dans la cuve à mercure. Le U est maintenu par un profilé en aluminium long de 1 m. Une réglette graduée de 2 en 2 mbars, entre 0 à 850 (soit 68 cm de long) peut coulisser et être bloquée en position fixe dans le profilé.

Nous avons utilisé deux appareils destinés à être placés à deux profondeurs différentes. L'un a une *canne longue* (36″ soit 90 cm), l'autre une *canne courte* (24″ soit 60 cm). Sur la canne courte le tube manométrique d'origine a été cassé et remplacé par un tube de diamètre intérieur 1 mm.

La connaissance de certaines caractéristiques de l'appareil est nécessaire pour apprécier les résultats obtenus. Nous allons examiner successivement :

les limites d'utilisation
le temps de réponse
l'influence de la température

1. *Les limites d'utilisation de l'appareil.*

Les parois de la bougie doivent être pleines d'eau pour que l'appareil de mesure ne communique pas avec l'atmosphère du sol. Par conséquent, une limite d'emploi du tensiomètre est la pression d'entrée d'air (Pea) de la bougie. Cette Pea peut être calculée par la formule de Laplace d'après le diamètre des pores. En l'occurence elle est donnée par le fabricant (850 à 1 000 mbars).

La dépression exercée sur l'eau de la bougie est lue sur le manomètre. Il y a intérêt à ce que la colonne d'eau soit continue, de façon à ne pas avoir à prendre en compte un effet thermique important sur la pression de l'air inclus.

L'expérience montre que la colonne d'eau peut se rompre pour une dépression de l'ordre de 500-600 mbars. Ce phénomène limite en fait l'emploi du tensiomètre dans une gamme de tension inférieure à la Pea. Dans nos essais de terrain, nous avons pu atteindre et dépasser 700 mbars. Depuis, P. MANTION (1968) a mis au point un procédé de dégazage permettant d'atteindre en laboratoire 900 mbars.

2. *Le temps de réponse.*

Lorsque le sol se dessèche et exerce une succion sur l'appareil, de l'eau passe de la bougie dans le sol jusqu'à l'établissement de l'équilibre. Quand la succion décroît, l'eau circule en sens inverse. Théoriquement, la teneur en eau, et donc la succion du sol étudié est influencée par l'instrument, inconvénient qui n'existe pas avec l'appareil originel de MATHIEU où l'opérateur abaisse la branche mobile du manomètre de façon que l'interface eau-mercure ne bouge pas.

La durée d'établissement de l'équilibre et donc le temps de réponse du système sol-appareil sont par conséquent liés à deux facteurs :

— l'inertie opposée par le système de mesure aux transferts de l'eau : c'est le temps de réponse propre à l'appareil ;

— la durée de l'homogénéisation de l'humidité du sol après avoir cédé ou reçu de l'appareil une certaine quantité d'eau. Cette durée est d'autant plus faible que le sol a l'aptitude à transférer rapidement l'eau et que le volume à transférer est faible.

Pour évaluer le *temps de réponse* propre de l'appareil, nous avons procédé de la manière suivante : la bougie est enfermée dans un cylindre hermétique communiquant avec une burette. Le cylindre est complètement rempli d'eau, la burette partiellement. L'équilibre initial est réalisé en plaçant le ménisque de la burette dans un plan horizontal passant par le milieu de la bougie. La réglette de lecture manométrique est calée de façon à ce que le zéro corresponde au niveau du mercure (zéro instrumental). La burette est alors rapidement abaissée d'une hauteur connue et on lit les indications successives du manomètre.

Les opérations ont été effectuées simultanément sur les deux appareils, une burette unique étant raccordée aux deux cylindres. Nous avons réalisé des essais avec deux dépressions, 50 et 100 cm (49 et 98 mbars). Lorsque l'équilibre est pratiquement réalisé, la burette est remontée à son niveau d'origine et on recommence les lectures.

Les résultats sont donnés sur la figure 9. L'origine des temps pour la deuxième phase (chute de tension) a été décalée vers la gauche pour la commodité de l'expression graphique. Un trait horizontal indique la valeur 98 mbars correspondant à la dépression imposée.

On constate que les appareils réagissent très vite et qu'au bout de deux à trois minutes on atteint 95 p. 100 de la tension imposée (la réalisation de l'équilibre vrai est asymptotique).

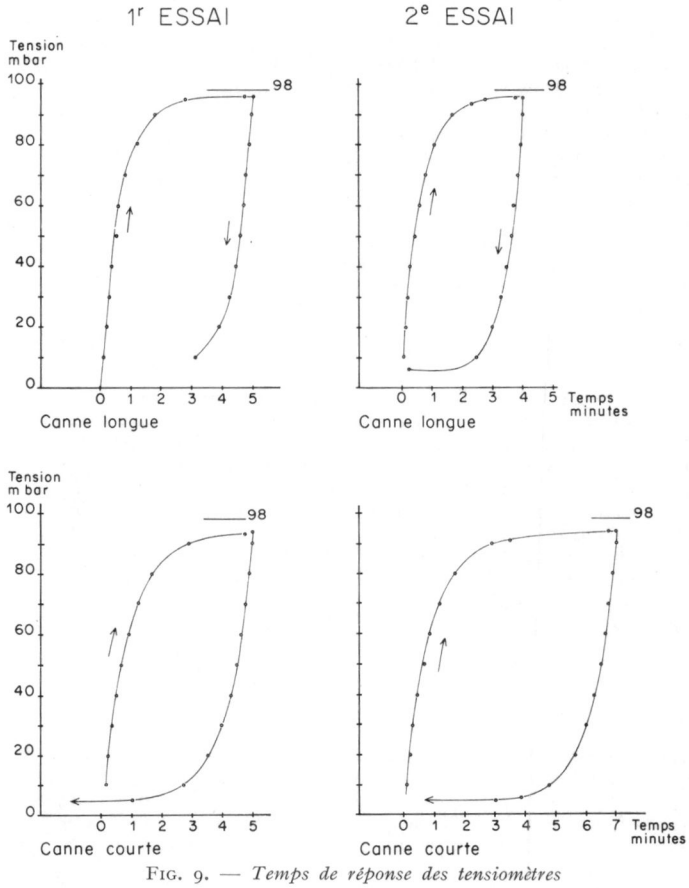


FIG. 9. — *Temps de réponse des tensiomètres*

Échange d'eau entre l'appareil et le sol.

Avec les appareils utilisés cet échange d'eau peut être calculé. Admettons que la tension de l'eau du sol passe de 0 à 100 mbars, soit environ 7,35 cm Hg. Le volume d'eau absorbé par le sol correspond au volume de mercure déplacé. Sur l'appareil d'origine le tube manométrique a un diamètre intérieur de 2 mm. Le volume d'eau absorbé par le sol est donc :

$$3{,}14 \times 0{,}01 \times 7{,}35 = 0{,}23 \text{ cm}^3.$$

Avec le tube de 1 mm de diamètre (canne courte), le volume d'eau pris par le sol est 0,06 cm^3. S. J. RICHARDS (1965) recommande de ne pas dépasser 0,1 cm^3/100 mbars. Nos appareils sont donc sensiblement dans ces normes.

3. *Influence de la température.*

a) *En conditions isothermes* on peut s'attendre à ce que la température intervienne sur la mesure à l'équilibre par différentes voies : la tension superficielle de l'eau du sol et la dilatation dans l'instrument. Le temps de réponse pourrait être affecté par la viscosité.

La tension superficielle décroît quand la température augmente. Un calcul montre l'influence que cela comporte sur la pression mesurée, à condition qu'elle soit assimilable à celle de Laplace.

$$P = \frac{2\,A}{r} \qquad \text{avec } \cos\alpha = 1$$

On a $A = 75$ dyn/cm à 5°
$73{,}5$ dyn/cm à 15°

D'où pour $r = 10^{-3}$ cm
$P_{(5^\circ)} = 150 \cdot 10^3$ dyn/cm² = 150 mbars
$P_{(15^\circ)} = 147 \cdot 10^3$ dyn/cm² = 147 mbars

Soit une baisse de 3 mbars pour une augmentation de 10° ou – 0,3 mbar/°C.

La dilatation de l'eau, et éventuellement du mercure dans l'instrument, peut chasser une fraction d'eau « instrumentale » vers le sol et contribuer à abaisser la tension. Cet effet serait donc dans le même sens que celui sur la tension superficielle. A notre connaissance, il n'a pas encore été étudié.

b) *En conditions anisothermes* les choses se compliquent, des gradients thermiques apparaissant entre le sol et l'instrument et dans le sol lui-même. Pour HAISE et KELLEY (1950), lorsque le tensiomètre est plus chaud que le sol, un courant de vapeur d'eau se déplace de la bougie vers le sol et contribue à augmenter la tension *lue*. Ces auteurs y voient la cause des fluctuations journalières qu'ils ont observées : augmentation de la tension le jour et abaissement de la nuit. GARDNER (1954) et TAYLOR (1961) ont montré des résultats inverses. Dans leurs expériences de laboratoire, seule la température du sol était modifiée, le manomètre étant à l'ambiance. Les deux études montrent une *réduction* de la tension avec l'élévation de température (3 à 8 mbars/°C).

C. — *Vérifications*

Ces données complexes et contradictoires nous ont incité à réaliser des mesures de contrôle sur un tensiomètre placé à 25 cm de profondeur. La réglette était tournée vers le nord et un thermomètre accroché au niveau du mercure. Les mesures ont été faites au cours de deux journées chaudes et sans pluie.

On remarque (fig. 10) au début de la journée *une élévation* de tension, suivie à partir de 10 heures d'une chute. Le premier stade reflète probablement la variation *réelle* mais atténuée de la tension de l'eau du sol.

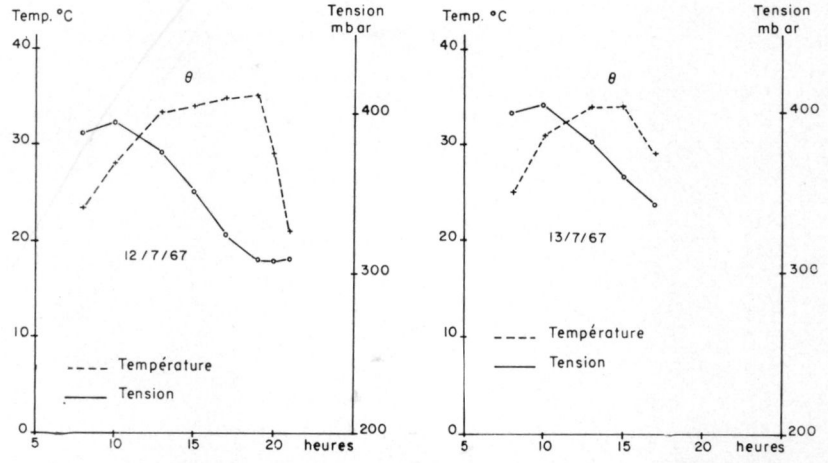


FIG. 10. — *Variation journalière de la tension de l'eau et de la température de l'air*

La chute ultérieure de tension est très importante (– 5 à – 7 mbars/°C) et confirme le sens et l'ordre de grandeur des données de TAYLOR et GARDNER. On constate également sur les figures que la tension marque un certain retard par rapport à la température ambiante. Un tel effet a été également noté par ces auteurs.

Ces résultats indiquent que la température du sol (et donc la tension vraie au niveau mesuré) sont hors de cause pour plusieurs raisons :

— les ordres de grandeur mesurés sont considérablement plus élevés que ceux calculés par la loi de Laplace. A la profondeur considérée, l'amplitude journalière de variation thermique est de 2 à 3° et l'incidence sur la tension ne devrait pas dépasser 1 mbar, au lieu des 100 observés.

— A 25 cm de profondeur, la variation de la température du sol est sensiblement en opposition de phase avec celle de l'air (GESLIN, 1934). Nous devrions par conséquent observer une augmentation de tension du matin au soir et non l'inverse.

Il est donc vraisemblable que la chute de tension observée est due à la dilatation des liquides instrumentaux (eau et mercure).

Ann. agron., 1969, **20** (5), 505-516.

CAPACITÉ DE CESSION DE L'EAU DES SOLS ET ESSAI D'INTERPRÉTATION DES DÉBITS

J. PUECH
avec la collaboration technique de M. HERNANDEZ

Station d'Agronomie et d'Œnologie, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

L'étude de la cession de l'eau utile aux végétaux, par des sols de textures variées, montre des comportements différents. Les mouvements d'eau ont alors été interprétés par analogie avec un comportement capillaire, en faisant appel à la notion de rayons équivalents. Cette approche permet de différencier les sols, du point de vue de leur capacité de cession de l'eau dans le temps.

I. — INTRODUCTION

L'alimentation en eau des plantes peut être considérée d'une façon statique, en évaluant la quantité d'eau du sol, retenue par des forces inférieures à celles que peut développer un végétal pour l'absorber. Toutefois, différents auteurs (HALLAIRE, 1960-1964 ; GARDNER, 1965 ; BOUCHET, 1965) ont montré que l'utilisation de cette eau dépendait de l'intensité des contraintes climatiques. Si la vitesse d'évaporation est plus élevée que la vitesse de transfert de l'eau du sol à la plante, il se produit un flétrissement temporaire, avec toutes ses conséquences, en particulier la fermeture des stomates ce qui limite ou bloque l'activité chlorophyllienne et par conséquent la croissance du végétal. Il est donc nécessaire de pouvoir associer aux relations humidité-force de succion, une caractéristique exprimant la facilité avec laquelle les différents types de sol peuvent céder leur eau. Une estimation du coefficient de conductivité ou de diffusivité devrait permettre de caractériser cette propriété, mais il est difficile de préciser ces grandeurs, étant donné l'aspect complexe que présente la circulation de l'eau non saturante dans les sols (HALLAIRE, HÉNIN, 1958).

D'autre part, on a souvent proposé d'utiliser le mécanisme de la diffusion pour interpréter cette circulation de l'eau dans les sols. Or, cette interprétation se heurte à des difficultés, comme l'ont montré divers auteurs (COLLIS-GEORGE, HÉNIN, KELLY, 1963 ; SINE, BENTZ, 1963 ; BALLIF, FEODOROFF, HÉNIN, 1966 ; PUECH, 1966) il peut y avoir, pour une certaine gamme d'humidité non saturante, déplacement de l'eau sans gradient ; le phénomène est d'autant plus net que la vitesse d'extraction est faible. Toutefois, on observe généralement dans la partie du profil proche de la zone d'extraction une augmentation de l'humidité avec la distance (GARDNER, 1960 ; COWAN, 1965 ; MORIZET, 1967 ; BLANCHET, 1968 ; PUECH, 1969) notamment dans nos essais avec le gel de silice comme absorbant, c'est-à-dire qu'il existe un gradient dans cette partie du profil. Dans ce cas on peut estimer que ce gradient est en relation avec le mouvement de l'eau et que ce dernier peut être provoqué par des effets de succion, étant donné que dans les conditions d'humidité considérées, le mouvement en phase vapeur est négligeable. Toutefois, le gradient d'humidité doit pouvoir être exprimé en terme de succion. Pour passer des humidités aux succions, il faut alors établir la courbe de succion en fonction de l'humidité $S_c = f(H)$ par une série d'expériences effectuées sur le même matériau, mais dans d'autres conditions. Pour utiliser cette donnée, nous pouvons partir de deux profils hydriques assez voisins et correspondants aux temps t_1 et t_2. Il est alors possible d'évaluer un débit en considérant la quantité d'eau écoulée à un niveau donné N, pendant le laps de temps $\Delta t = t_2 - t_1$. Le débit est égal à la somme des pertes en eau des différents niveaux, depuis la cote o fond du tube jusqu'au niveau de référence N considéré.

Si nous admettons que l'écoulement s'effectue sous l'effet d'un gradient de succion, il faut évaluer celui-ci en tenant compte aux temps t_1 et t_2 des humidités successives h_{n_1} et h_{n_2} au niveau N considéré ; on pourrait alors, en connaissant le gradient de succion et la valeur du débit, obtenir la valeur correspondante de la conductivité. Mais le calcul doit être envisagé non pas comme s'appliquant à la totalité de la terre, mais à la surface active, intervenant effectivement dans le transfert d'eau. Par conséquent en divisant le débit par cette surface active, nous aurons une grandeur ayant les dimensions d'une vitesse, ce sera la vitesse moyenne d'écoulement pour la tranche d'eau considérée.

Ces déductions reposent sur les principes exprimés par la loi de Poiseuille. Nous avons alors essayé d'interpréter les conditions de circulation de l'eau non saturante dans le sol en nous appuyant sur cette loi. Toutefois, de nombreux travaux ont souvent fait appel aux notions de capillarité dans le cas de sols schématiques par exemple, et ont aussi montré les limites de ce type d'approche (HÉNIN, 1936, 1960 ; DEMOLON, 1951 ; HALLAIRE, 1953 ; BAVER, 1956 ; SOEIRO, 1961 ; FEODOROFF, 1965 ; SLATYER, 1967, etc...).

En effet, il y a de nombreuses difficultés à assimiler le sol à un système de capillaires ; les sections de passage ont plutôt l'allure de polygones curvilignes irréguliers ou de triangles, plutôt qu'une allure circulaire. De plus elles sont limitées par des parois convergentes ou divergentes (HÉNIN *et al.*, 1960 ; CHAUVETEAU, 1965 ; FEODOROFF, 1965).

Enfin, il est assez difficile d'évaluer correctement le nombre de capillaires par unité de surface. Toutefois, on peut, du point de vue de l'écoulement, parler à la limite d'un « comportement capillaire » et de rayon équivalent, en envisageant en même temps les limitations de ce concept.

II. — TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

Le protocole expérimental complet a été décrit dans un précédent travail (PUECH, 1969). Les essais ont porté sur 3 sols différents remaniés, amenés à même porosité : sols argileux, limoneux et sableux, dont les caractéristiques sont données au tableau 1. L'extraction de l'eau a été effectuée par le gel de silice. Les tubes contenant la terre (porosité 45 p. 100 et humidité donnée) sont bouchés à une extrémité tandis que l'autre est mise en contact avec l'absorbant. Après des temps d'extraction variables en conditions isothermes, les colonnes de terre sont découpées en tranches dont on détermine l'humidité, pour établir les profils hydriques et les données dérivées. On peut ainsi établir dans le temps, les différents profils en partant d'échantillons d'humidité initiale donnée.

TABLEAU I

Propriétés physiques et hydriques des sols utilisés

	Analyse granulométrique en p. 100						Caractéristiques hydriques (H_2O % T. S.)	
	Argile < 2 μ	Limon fin 2-20 μ	Limon grossier 20-50 μ	Sable moyen 50-200 μ	Sable grossier 200-2 000 (μ)	Matière organique	Capacité au champ	Humidité point flétrissement permanent
Sol argileux...	31,7	18,8	19,0	14,7	13,1	1	22,5	11,1
Sol sableux...	3,2	3,6	11,9	28,8	50,2	0,9	10,9	2,3
Sol limoneux..	12	18,1	43,3	13,5	10,3	1,4	20,8	6,5

Enfin, les courbes « pression-humidité » (pF) ont été établies par les différentes techniques classiques (STUDER, 1961). Pour la détermination de la capacité au champ, il a été tenu compte des valeurs de terrain et de la texture.

III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. *Comportement capillaire du système étudié*

La loi de Poiseuille permet de calculer les débits Q de capillaires de même rayon R. D'après cette formule, le débit Q est proportionnel à la 4e puissance du rayon R, à la différence de pression P et inversement proportionnel à la longueur L du tube.

$$Q = \frac{\pi R^4 \rho g \Delta P}{8 \eta \Delta L} \qquad (1)$$

Les symboles ont le sens suivant :

R = rayon du capillaire
ρ = densité du liquide
g = accélération de la pesanteur
η = viscosité
$\frac{\Delta P}{\Delta L}$ = gradient de pression.

La vitesse moyenne $\bar{V}$ peut alors s'exprimer par la relation suivante, si S est la section de passage :

$$\bar{V} = \frac{Q}{S} \tag{2}$$

d'où en tenant compte de (1)

$$\bar{V} = \frac{\pi R^4 \rho g \Delta P}{\pi R^2 8 \eta \Delta L}$$

$$\boxed{\bar{V} = BR^2 \frac{\Delta P}{\Delta L}}. \tag{3}$$

Si nous pouvons évaluer $\bar{V}$ et $\frac{\Delta P}{\Delta L}$ nous pouvons connaître R^2 et c'est ce que nous avons tenté de déterminer. Mais dans le cas d'un sol, et pour la surface totale de passage considérée, on est amené à imaginer l'existence de n capillaires par unité de surface. La vitesse sera donc le quotient du débit du filtre par la section effectivement active.

Considérons à présent un intervalle de temps assez court, le débit total Q observé dans le sol est la somme des débits de tous les capillaires existants, de rayon décroissant : R_1, R_2. R_3, $\cdots$ R_n :

$$Q = \frac{\pi \rho g \Delta P}{8 \eta \Delta L} \cdot \sum (R_1^4 + R_2^4 + R_3^4 + \cdots + R_n^4) \tag{4}$$

La vitesse d'écoulement dépendant de R^2 et le débit de R^4, il est peu probable que le débit écoulé dans les capillaires les plus petits ait une influence très sensible sur le débit mesuré ; celui-ci peut alors être attribué dans un laps de temps assez court à une classe préférentielle des rayons moyens R_m (tabl. 2).

TABLEAU 2

Comparaison des valeurs de R^2 et R^4 par rapport au rayon R

Valeurs de R en cm						
R 10^{-4}	2	1,5	1	0,70	0,3	0,01
R^2 10^{-8}	4	2,25	1	0,49	0,09	0,000 1
R^4 10^{-16}	16	5,06	1	0,24	0,002 7	0,000 000 01

Le débit peut alors en première approximation être celui de n capillaires, de rayon équivalent moyen R_m. Le problème revient donc à savoir quelle est la taille des capillaires qui ont fonctionné et leur nombre par unité de surface, dont dépend le débit. Pour le milieu étudié, il faut donc connaître la section utile Su, participant effectivement à la circulation de l'eau.

Nous aurons alors en considérant le dispositif comme un filtre :

$$Q = Su \times V = Q_c \times n \tag{5}$$

avec $$n = \frac{Su}{\pi R_m^2}$$

V = vitesse
Q_c = débit d'un capillaire
n = nombre de capillaires
R_m = rayon moyen du capillaire

Pour calculer cette section utile dans le cas d'un sol non saturé, il faut d'abord tenir compte de la section utile maximale Su_{max}, fonction de la section totale S du dispositif utilisé et de la porosité du milieu considéré P_0. Il faut considérer également le degré de saturation, donné par le rapport de la quantité H_t d'eau existante à un moment t à la quantité H_{max} qui sature le milieu poreux.

$$Su_{max} = S \times P_0 \times \frac{H_t}{H_{max}}.$$

On peut alors estimer qu'entre deux temps voisins, t_1 et t_2, la section utile active Su_{act} est proportionnelle à l'écart entre les humidités h_{n2} et h_{n1} à la section N.

$$Su = S \times P_0 \times \frac{h_{n1} - h_{n2}}{H_{max}}. \tag{6}$$

Enfin, les profils hydriques étant en cours de dessèchement, nous évaluerons la différence de succion $\Delta s_c = \frac{\Delta P}{\Delta L}$, en nous reportant sur la courbe $S = f(H)$ prise en dessiccation et en considérant pour la section considérée la différence de succion entre les points h_{n1} et h_{n2}. L est la longueur de la colonne soumise à la succion. En tenant compte de (5), on a la relation suivante :

$$Q = \frac{\pi R_m^4 \rho g}{8\eta} \times \Delta s_c \times \frac{Su}{\pi R_m^2} \tag{7}$$

d'où on peut tirer R en tenant compte des valeurs de Δs_c, de Su et de Q :

$$R_m^2 = \frac{8\eta Q}{\rho g \times \Delta s_c \times Su}. \tag{8}$$

Il s'agit alors de savoir si les approximations faites en confondant une variation réelle bien que petite avec une différentielle, en évaluant indirectement la succion à partir de l'humidité et enfin en admettant que le débit total est essentiellement constitué par la tranche d'eau qui s'est écoulée, sont suffisamment proches de la réalité. Il existe une possibilité de vérifier la cohérence du système d'interprétation, en comparant le rayon des capillaires, estimé par le débit et la vitesse d'écoulement, avec les valeurs déduites de la loi de Jurin, si nous faisons l'hypothèse qu'à chaque valeur de pF correspond un rayon équivalent de capillaire :

$$R = \frac{2A}{\rho g H} \cos \alpha$$

où

A = tension superficielle
ρ = densité du liquide
g = accélération de la pesanteur
α = angle de raccordement solide liquide
H = hauteur maximum d'ascension capillaire

La figure 1 reproduit en ordonnées les valeurs du rayon R calculées avec la loi de JURIN et en abscisses les valeurs estimées avec la loi de Poiseuille. Les résultats portent sur trois sols de texture limoneuse, sableuse et argileuse. Les données sont

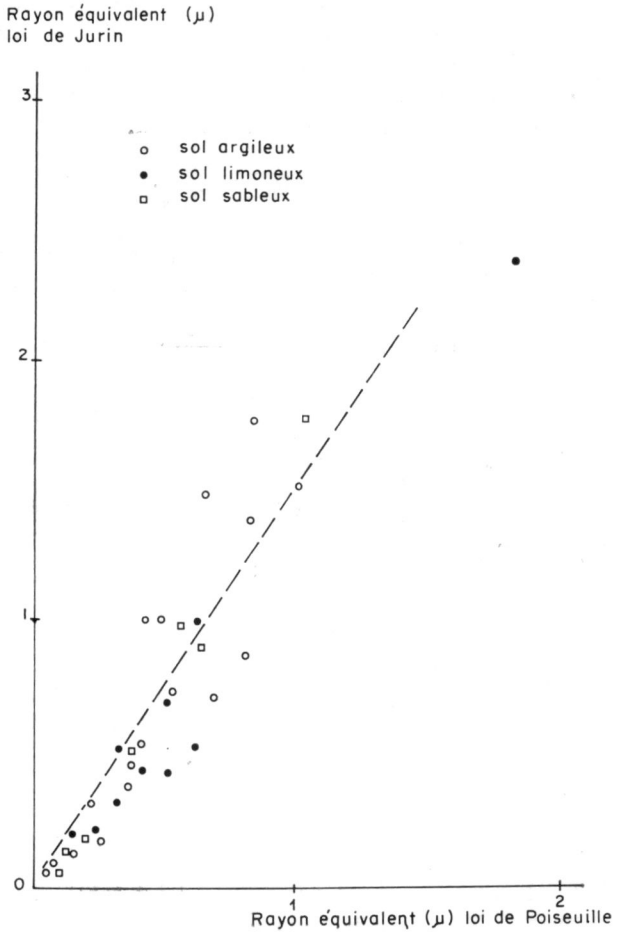


FIG. 1. — *Comparaison entre la 2e et 3e heure de succion des rayons équivalents théoriques* (loi de Jurin) *et des rayons équivalents obtenus par écoulement* (loi de Poiseuille). *Cas de sols sableux, limoneux et argileux pris à différentes humidités initiales*

obtenues sur deux profils hydriques successifs entre la deuxième et la troisième heure de succion. On peut constater comme le montre la droite de régression qu'il existe un certain accord entre les valeurs calculées et estimées ($r = 0{,}77$). Ce résultat peut

être considéré comme satisfaisant, en particulier parce que les points correspondant aux divers sols sont assez voisins ; or, du fait des types texturaux utilisés, les humidités correspondant aux différentes succions sont très variées et les gradients obtenus sont eux-mêmes assez différents. La validité du résultat peut donc être assurée ; quant aux différences observées, elles sont évidemment imputables, au moins pour une large part, aux imprécisions des mesures et aux approximations introduites dans notre méthode de calcul.

Ce résultat nous conduit donc à caractériser la capacité d'un sol à céder son eau au végétal, que nous appellerons la « cessibilité », par la courbe de distribution des pores du sol et fonctionnels aux différents stades. La méthode de l'écoulement étant assez imprécise et laborieuse, il sera préférable de s'adresser directement à une courbe de succion.

2. *Cessibilité de l'eau du sol*

Dans un travail précédent (PUECH, 1969), nous avons observé des potentialités de débits différentes pour les 3 sols utilisés. Le sol limoneux présente pendant un temps assez long, un débit supérieur à celui noté sur sable ou argile, pour des humidités comparables (voisines de la capacité au champ par exemple). Si nous considérons que le débit observé est le résultat d'une circulation de l'eau dans un réseau à « comportement capillaire », nous sommes amenés à étudier le problème de la « cessibilité » en déterminant les familles de « capillaires » successivement fonctionnelles. Par exemple, pour les sols à la capacité au champ, les rayons initiaux donnent à ce moment $R_S > R_L > R_A$, d'où des débits instantanés différents, mais la perte totale dans le temps, sera fonction de la section efficace, en jeu à chaque instant, donc du nombre de capillaires actifs pour chaque type de sol. Nous devons alors établir des classes de capillaires, dont les dimensions donnent des comportements en débit assez homogènes. Nous pourrons comparer les potentialités de chaque sol en prenant par exemple, le pourcentage d'eau contenu dans chaque classe par rapport à la capacité au champ prise comme base 100.

La figure 2 montre ainsi les caractéristiques des 3 sols étudiés. Le sol sableux a une part importante de ses réserves dans les rayons élevés, puis les quantités d'eau deviennent moins importantes dans les autres classes. Pour le sol limoneux, la réserve est importante dans les rayons relativement élevés alors que l'argile n'a que peu de réserve dans ces domaines.

Le débit étant fonction de R^4 et la vitesse de R^2, la cession de l'eau sera potentiellement très rapide dans le sable, un peu moins dans le limon et moindre dans l'argile. Mais si nous tenons compte des réserves totales et des réserves existantes dans chaque classe (fig. 3), nous pouvons, dans des conditions standards de contrainte, connaître le temps relatif mis pour vider une classe de capillaire (tabl. 3) autrement dit avoir une représentation schématique de la résistance à la dessiccation. Ce schéma toutefois, ne peut être considéré qu'à partir du moment où les classes de capillaires deviennent communes dans les différents sols ; or à ce moment le sol sableux a déjà perdu, mais très vite, 45 p. 100 de son eau et le limon 13 p. 100, ce qui correspond bien au comportement réel de ces sols, le sable et le limon se vidant beaucoup plus rapidement que l'argile.

Il faudra, bien entendu, comparer ces données avec le comportement des végé-

taux, placés dans diverses conditions d'évapotranspiration, de façon à définir les courbes de distribution de pores qui offrent aux plantes les meilleures conditions d'alimentation.

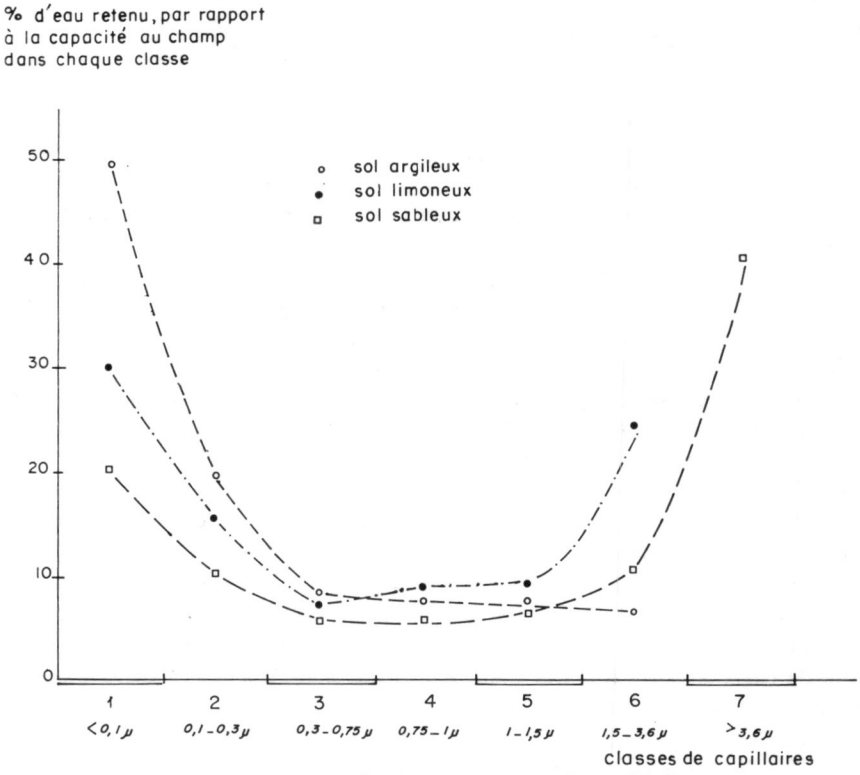


FIG. 2. — *Comparaison pour les 3 types texturaux du p. 100 d'eau retenu, par rapport à la capacité au champ, dans chaque classe de capillaires*

CONCLUSION

L'étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante, de différents sols de même porosité totale, vers une zone d'absorption, nous a amené à rechercher les critères de la disponibilité de l'eau des sols. L'étude de la capacité de cession ou « cessibilité » de l'eau des sols, amène à imaginer un comportement de type capillaire en ce qui concerne la gamme d'humidité utile pour les végétaux. L'analogie capillaire permet alors de représenter la circulation liquide de l'eau dans une gamme d'humidité où l'importance de la phase vapeur est faible. Cette dernière n'intervient vraiment qu'aux assez faibles teneurs en eau. Il est alors nécessaire pour définir la cessibilité en eau du sol, de connaître les sections réellement actives du point de vue des débits ainsi que la taille et le nombre moyens des pores fonctionnels dans le temps. La confrontation des rayons équivalents moyens, obtenus par utilisation de la loi de Poiseuille et ceux déduits de la loi de Jurin, montre une concordance assez bonne, bien que la valeur des angles de raccordement ne soit pas exactement définie.

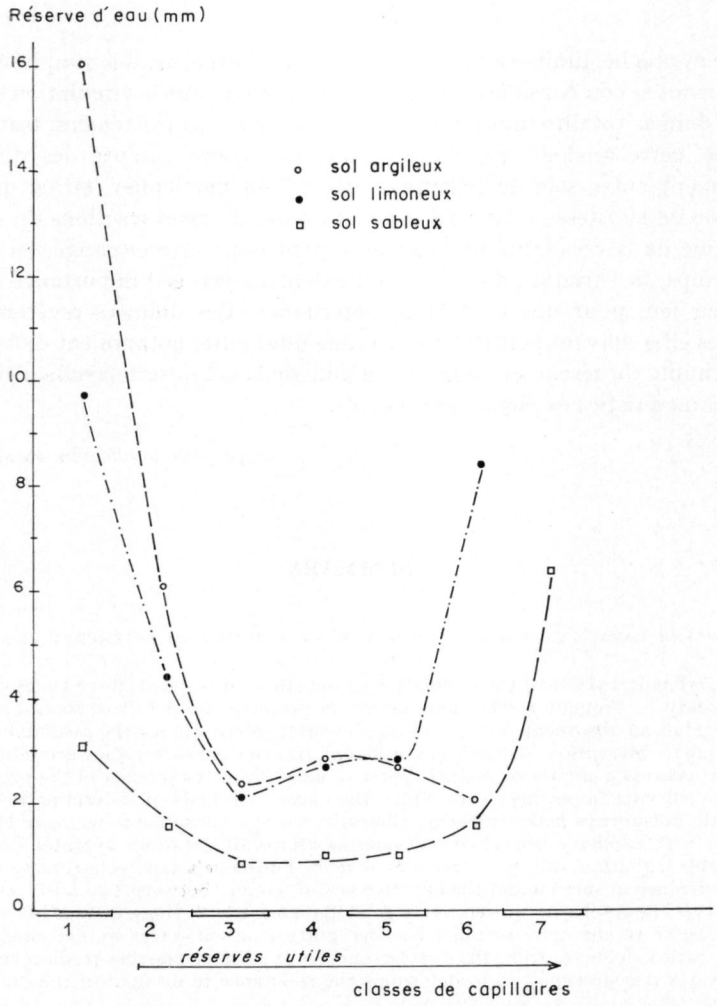


FIG. 3. — *Réserve d'eau susceptible de participer à l'alimentation hydrique, dans chaque classe de capillaires*

TABLEAU 3

Temps relatif mis pour vider une classe de capillaires pour des gammes d'humidité analogues (sol sableux pris comme référence) *et en tenant compte de l'importance des réserves*

Sol	Classe de capillaires				
	VI	V	IV	III	II
	1,5 à 3,6 μ	1 à 1,5 μ	0,75 à 1 μ	0,30 à 0,75 μ	0,1 à 0,30 μ
Sol sableux...	1	1	1	1	1
Sol limoneux	5,3	2,9	2,9	2,2	2,7
Sol argileux .	1,4	2,9	2,9	2,3	3,9

Cette approche, limitée à la gamme d'humidité utile, semble simplifier les phénomènes, surtout si l'on considère les mécanismes en jeu dans la circulation de l'eau non saturante dans sa totalité (films, ménisques, résistance par frottement, tortuosité, etc). Cependant, cette analogie capillaire permet de rendre compte des différences de comportement entre sols de textures variées ; en particulier, en ce qui concerne l'évaluation de la vitesse relative d'évacuation des diverses fractions du stock d'eau. Le problème de la cessibilité de l'eau utile peut donc être envisagé, en connaissant dans le temps, la variation du rayon équivalent moyen et l'importance des sections efficaces en jeu, pour une contrainte déterminée. Ces données revêtent un aspect global mais elles doivent permettre une étude ultérieure, notamment dans le domaine de la continuité du réseau et de la dynamique de la colonisation radiculaire, en fonction des caractéristiques physiques des sols.

Reçu pour publication en août 1969.

SUMMARY

TRANSFER CAPACITY OF SOIL WATER AND AN ATTEMPT TO INTERPRET THE FLOW

An experimental study of the circulation of unsaturated water in three types of soil — clay, silty and sandy — brought to the same degree of porosity, the effect of roots being simulated with silica gel as an absorbent, led us to some research on criteria for the availability of water in the soils under observation. These show different transfer characteristics according to texture, especially as regards a greater or smaller degree of mobility in the interior of the profile, humidity gradients of varying importance, etc. Since the classic methods of determination by diffusion equations do not always make sufficient allowance for the phenomena, we have turned back to the analogy with capillary behaviour, considering above all the range of water useful to plants. A comparable equation has been calculated from Poiseuille's law, referring to the measured flow, the difference in suction and the effective useful section, between two fairly short periods of time, t_1 and t_2. The results are in relatively good agreement with those deduced from Jurin's law. It seems feasible to characterize the « transferability » of soil water by determining classes of equivalent ratios deduced from the suction curves. It is then possible to discover the relative speeds of water transference and to determine the resistance to drought of the different kinds of soil texture.

ZUSAMMENFASSUNG

ABGABEVERMÖGEN DES GRUNDWASSERS
UND VERSUCH ZUR DEUTUNG DER ABFLUSSMENGEN

Die experimentelle Untersuchung des nicht sättigenden Wasserkreislaufs in 3 auf die gleiche Gesamtporosität gebrachten Böden verschiedener Natur : toniger, schlammiger und sandiger Boden, mit Simulation der Wurzelwirkung, durch Silikagel als Absorbens, hat uns dazu geführt die Kriterien der Verfügbarkeit des Wassers für die untersuchten Böden zu ermitteln. Letztere zeigen besondere Abgabeeigenschaften, insbesondere als Funktion des Gefüges ; mehr oder weniger leichte Beweglichkeit des Wassers innerhalb des Profils, kleinerer oder grösserer Feuchtigkeitsgradient, usw...

Da die klassischen Bestimmungen anhand der Diffusionsgleichungen die Vorgänge nicht immer vollständig wiedergibt, wurde versucht auf die Analogie mit dem Kapillarverhalten zurückzugreifen unter besonderer Betrachtung des für Pflanzen nutzbaren Wasserbereichs. Ausgehend vom Gesetz von Poiseuille, wurde ein gleichwertiger Halbmesser berechnet, unter Berücksichtigung der, zwischen den zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 von ziemlich kurzer Dauer, gemesse-

nen Ausflussmenge, des Unterschiedes in der Saugwirkung und des nutzbaren Wirkungsquerschnitts. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den nach dem Gesetz von Jurin abgeleiteten Halbmessern, zeigt eine relativ gute Übereinstimmung. Es erscheint möglich, das « Abgabevermögen » des Grundwassers duch die Bestimmung von Klassen äquivalenter Halbmesser, die sich aus den Saugwirkungskurven ableiten lassen, zu kennzeichnen. Somit werden die relativen Wasserabgaebge schwindigkeiten bekannt und der Widerstand gegen das Austrocknen der verschiedenen Gefügetypen lässt sich bestimemn.

РЕЗЮМЕ

Емкость отдачи воды почвенной влагой и опыт интерпретации расходов.

Ж. ПЮЭШ.

Экспериментальное изучение передвижения ненасыщающей влаги в трех типах почв (глинистой, суглинистой и песчанной), приведенных в состояние одинаковой порозности, со стимуляцей корневого эффекта при помощи силикатного геля в качестве поглотителя, привело автора к идее установления критериев свободной наличности влаги в изучавшихся почвах. Почвы эти отличаются характерными особенностями в смысле отдачи воды, зависящими в частности от структуры, большей или меньшей подвижности влаги в профиле, повышенного или пониженного градиента влажности, и т. д. В виду того что классические определения с помощью формул диффузии не всегда дают точное представление об этих явлениях автор попытался достичь результата по аналогии с поведением капиллярных сосудов, отдавая особое внимание гамме вод полезных для растительности. Исходя из закона Пуазэя он вычислил эквивалентный радиус, принимая во внимание измерявшийся расход, разницу во всасывании и эффективно-полезное сечение в течении короткого отрезка времени между t_1 и t_2. Результаты сравнивались с радиусами полученными при применении закона Жюрэна и полученная согласованность оказалась относительно хорошей. Автор полагает что емкость отдачи воды почвенной влагой может быть охарактеризована определением эквивалентных радиусов полученных при помощи кривых всасывания. Это даст возможность определить относительную скорость отдачи воды и противодействие засухе почв различного механического состава.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALLIF L., FEODOROFF A., HÉNIN S., 1966. Sur les modalités de la dessiccation en phase liquide de l'eau saturante dans le cas de dessèchement d'un sol. *C. R. Acad. Sci.*, **262**, 1866-1868.

BALLIF L., FEODOROFF A., HÉNIN S., 1966. Distinctions des transferts d'eau à l'état liquide ou vapeur au cours du dessèchement d'un sol nu. *C. R. Acad. Sci.*, **263**, 1958-1960.

BAVER L. D., 1966. In *Soil Physic*, 224-303, 7e édit., John Wiley and Sons, London.

BLANCHET R., 1968. La nutrition des plantes. *Bull. tech. Inf.*, **231**, 533-539.

BOUCHET R. J., 1965. Rendement des cultures et déficit en eau. *Bull. tech. Inf.*, **201**, 539-551.

CHAUVETEAU G., 1965. *Essai sur la loi de DARCY et les écoulements laminaires à perte de charge non linéaire.* Thèse Faculté des Sciences de Toulouse, 189 p.

COLLIS-GEORGE N., HÉNIN S., KELLY J. A., 1963. Étude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **273**, 242-244.

COWAN I. R., 1965. Transport of water in the soil plant atmosphère system. *Appl. Ecol.*, **2**, 221-239.

DEMOLON A., 1951. *Dynamique du sol.* Dunod, Paris.

FEODOROFF A., 1965. Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. Thèse. *Ann. agron.*, **16**, 2, 127-175 ; 3, 231-263.

GARDNER W. R., 1960. Dynamic aspects of availability to plants. *Soil Sci,*. **89**, 63-73.

GARDNER W. R., 1965. Dynamic aspects of soil water availability to plants. *Ann. Rev. plant physicol.*, **16**, 323-342.

HALLAIRE M., 1953. Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. *Ann. agron.*, **11**, 143-244.

HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Physiol. vég.*, **2**, 119-130.

HALLAIRE M., 1964. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. In *L'eau et la production végétale*, 15-25, I. N. R. A., Paris.

HALLAIRE M., HÉNIN S., 1958. Dessèchement du sol et évolution des profils hydriques. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 2151-2153.

HÉNIN S., 1936. Idées actuelles sur l'eau du sol et ses rapports avec la plante. *Ann. agron.*, 723-741.

HÉNIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le Profil cultural.* 320 p., S. E. I. A., Paris.

MORIZET J., 1967. Étude de la circulation de l'eau non saturante dans différentes terres, en régime de dessèchement. *Ann. agron.*, **18**, 267-283.

PUECH J., 1966. Modalités de la dessiccation des sols par le gel de silice. *C. R. Acad. Sci.*, **263**, 645-648.

PUECH J., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols, vers une zone d'absorption . *Ann. agron.*, **20**, 245-261.

SINE L., BENTZ A., 1963. Note sur la mesure de la conductivité capillaire des sols (cas des faibles tensions). *Bull. Inst. agron. Stat. de Rech.* Gbx, XXXI, 3, 322-358.

SINE L., BENTZ A., 1965. Mesure de la conductivité capillaire des sols (cas des faibles tensions). *Bull. Inst. agron. Stat. de Rech.* Gbx, XXXIII, **3**, 441-454.

SLATYER R. O., 1967. In *Plant-water relationships* 93-126. Academic Press, London and New York.

SOEIRO F. A., 1961. Le coefficient de perméabilité des matériaux non saturés et son application à l'étude du mouvement de l'eau dans les sols. 5e *Congrès international de Mécanique des sols et des travaux de fondations*, 359-365.

STUDER R., 1961. Méthodes de détermination des réserves hydriques des sols. *Ann. agron.*, **12**, 6, 599-608.

Ann. agron., 1969, **20** (5), 517-526.

NOTE COMPLÉMENTAIRE [1]

LES SOLS NOIRS, TRÈS RICHES EN MATIÈRES ORGANIQUES REPOSANT SUR LEUCOGRANITES DANS LA RÉGION D'EYMOUTIERS-PEYRAT-LE-CHATEAU (HAUTE-VIENNE)

J. DEJOU*, J. GUYOT*, J. MORIZET*, M. JAMAGNE** et Marguerite MARIN***
avec la collaboration technique de Colette CHAUMONT* et R. MILLET*.

* *Station agronomique, 30, rue Vieille Prison, 36 - Châteauroux*
***Service de la Carte pédologique de France,*
Centre national de recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique
****Élève de l'École nationale supérieure des Sciences agronomiques appliquées, 21 - Dijon.*

SOMMAIRE

Les sols noirs de la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute-Vienne), précédemment classés pour la majorité d'entre eux dans le groupe des ocres podzoliques, s'apparentent en réalité aux types bruns acides à mull-moder, dont ils représentent le faciès humifère.

INTRODUCTION

Lors d'une étude récente (1968), consacrée à l'examen des sols noirs très riches en matières organiques reposant sur leucogranites dans la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute Vienne), l'équipe de la Station de Châteauroux avait proposé de ranger la majorité de ces sols, un peu spéciaux, parmi les types ocre-podzoliques. La morphologie des profils de type A (B) C dominant, avec un horizon (B) caractérisé surtout par sa couleur ocre, nous avait, en effet amené à une telle conclusion.

[1] La première note a paru dans *Ann. agron.*, 1968, **19** (5), 511-539.

Or, à la suite de nouveaux examens, nous sommes conduits à réviser notre première opinion, et à ne plus considérer les sols noirs comme des types ocre-podzoliques mais au contraire comme des faciès humifères de sols bruns acides. Trois catégories d'arguments étayent notre point de vue :

1. les résultats des déterminations micromorphologiques;
2. l'étude des acides fulviques et humiques de la matière organique;
3. la détermination de l'Al libre dans plusieurs horizons de sols et son évolution le long du profil.

I. — DÉTERMINATIONS MICROMORPHOLOGIQUES

La constitution et la structure de 3 horizons différents d'un même profil ont été examinées à l'aide de préparations microscopiques :

a) l'horizon C, correspondant à la partie supérieure de l'arène (vers 60 cm),

b) l'horizon (B), d'altération, de couleur ocre : 7,5 YR 5/6 (40-60 cm),

c) l'horizon A, très noir, 10 YR 2/1 (0-20 cm), correspondant à la partie supérieure du sol.

Horizon C — Fig. 1.

L'arène apparaît formée d'une association de minéraux, un peu à la manière d'une roche gréseuse à ciment pélitique, et correspondant à un matériau leucogranitique microdivisé. *Le squelette*, très hétérogène, est en effet constitué de phénocristaux de l'ordre du 1/10 de mm : quartz à extinction roulante, pouvant être fracturé par des diaclases, feldspaths potassiques perthitiques de même allure que dans le granite frais, plagioclases ayant conservé leurs clivages et plus ou moins sériciti sés, biotite ayant perdu une partie de son polychroïsme. A côté des phénocristaux, on observe un matériau interstitiel, constitué d'un assemblage de cristaux variés, de faible dimension, plus ou moins brisés avec quartz, résidus de plagioclases et fragments de phyllites altérés.

Le plasma est pratiquement inexistant, quelques traces en sont cependant localisées dans des fractures ainsi qu'en bordure de certains gros éléments du squelette.

Aucune séparation plasmique typique n'est observable, *l'assemblage plasmique* est du type « silasepique ».

L'assemblage élémentaire est essentiellement granulaire, tandis que les *vides* se présentent sans organisation et constituent de simples cavités d'entassement.

Comme *traits pédologiques* on ne peut signaler que la présence de quelques ségrégations ferriques non orientées, issues de l'altération.

Horizon B — Fig. 2.

On observe dans cet horizon un accroissement très sensible de la matière interstitielle, traduisant une microdivision plus accusée, ainsi qu'une altération plus importante des matériaux phylliteux.

Le squelette apparaît comme particulièrement hétérogène.

Le plasma, assez hétérogène, apparaît aux forts grossissements comme constitué par une multitude de petits cristaux phylliteux ; les véritables « domaines plasmiques » sont rares ; ils sont localement représentés en surface de certains cristaux en voie d'altération.

De très petites *séparations* apparaissent distribuées dans la masse de la matière interstitielle.

L'assemblage plasmique est donc difficile à définir ; il représente une transition entre les types « silasepique » et « insepique ».

L'assemblage élémentaire est à tendance intertextique d'une manière générale à aggloméré par endroits.

Les vides sont plus organisés que dans l'horizon C ; on observe de nombreuses chambres et cavités sans aucun recouvrement des parois.

Les traits pédologiques sont peu nombreux. Quelques concentrations d'oxydes de fer apparaissent dans les fractures des cristaux, ainsi qu'au sein du plasma où elles tendent à la formation de nodules diffus.

Très peu de caractères de mobilité apparaissent donc pour le fer, tandis qu'aucun déplacement colloïdal n'est décelable dans l'horizon.

Horizon A — Fig. 3.

L'aspect de cet horizon est très particulier et se présente sous forme d'un mélange assez régulier des constituants minéraux et organiques.

Le squelette est analogue à celui décrit pour les horizons B et C, mais on constate assez nettement une proportion moindre de minéraux micacés.

Le plasma, très aggloméré, ne présente que très peu de dissociation entre argile et matière organique.

On observe de petits grumeaux à limites irrégulières du type mull, localement associés à des unités plus sombres, opaques, du type moder.

L'aspect général est celui d'un horizon A assez évolué, les débris de matière organique étant cependant bien représentés.

De petites *séparations plasmiques* très biréfringentes, peut-être constituées par de très petits cristaux, apparaissent au sein des unités du plasma.

L'assemblage élémentaire est aggloméré à granulaire localement.

Les *vides* sont très nombreux et de formes diverses : cavités, chenaux, vides d'entassement, se présentant quelquefois en chapelets, et liés à l'activité biologique.

Les *traits pédologiques* sont constitués essentiellement par les agglomérats plasmiques de matière organique, argile et fer.

En conclusion, il semble que l'altération du matériau originel s'effectue essentiellement sous forme d'une microdivision très poussée provoquant l'apparition d'un « plasma » très riche en petits fragments phylliteux.

L'horizon (B) est un horizon d'altération où aucun indice d'entraînement d'éléments ne peut être mis en évidence, tandis que l'horizon A très humifère présente toutes les caractéristiques d'un mull-moder.

Ainsi, aucun phénomène de micropodzolisation n'est décelable par les examens micromorphologiques.

TABLEAU I

Évolution des acides fulviques et humiques des sols de Saint-Amand-le-Petit - Peyrat-le-Château

N° échantillon	Type de profil	Profondeur (en cm)	Horizon	C total °/oo	AF C °/oo	AH C °/oo	% AF / C total	AF / AH	(AF + AH) / C °/oo	(AF + AH) / C total
11	Sol très noir cultivé	0- 20	A_{1-1}	62	5,9	4,9	9,5	1,2	10,8	17,4
12		20- 35		43	5,2	4,5	12,1	1,15	9,7	22,5
13		35- 45	A_{1-2}	42	5,4	6,1	12,8	0,88	11,5	27,4
14		50- 80	(B) C	11	2,6	0,08	23,6		3,4	30,9
21	Sol très noir (Lande à Callune)	3- 20	A_1	68	4,1	6,1	6,0	0,67	12,2	18,8
22		20- 35	(B)	8	1,1	0,8	13,8	1,37	1,9	23,7
23		35- 60	C	5	1,0	0,7	20,0	1,4	1,7	34,0
11-1	Sol très noir (Lande à callune)	3- 25	A_0A_1	63	7,0	7,2	11,1	0,97	14,2	22,5
11-2		25- 35	A_{1-2}	19	3,8	2,9	20,0	1,3	6,7	35,3
11-3		35- 60	(B)	16	2,2	2,0	13,7	1,1	4,2	26,2
11-4		60- 80	C							
20-1	Sol brun acide sur colluvions (prairie naturelle)	2- 30	A_{1-1}	17	3,1	2,2	18,2	1,4	5,3	31,1
20-2		30- 50	A_{1-2}	12	1,4	2,3	11,7	0,6	3,7	30,8
20-3		90-120	(B)							
35-1	Sol très noir sous forêt de Pin	3- 40	A_{1-1}	64	5,8	8,7	9,1	0,67	14,5	22,7
35-2		40- 50	A_{1-2}	37	2,0	4,7	5,4	0,42	6,7	18,1
35-3		50- 65	(B_{1-1})	19	0,4	2,3	2,1	0,17	2,7	14,2
35-4		65- 85	(B_{1-2})	10	1,7	0,6	17,0	2,8	2,3	23,0
35-5		85-100	C							

II. — ESTIMATION DE LA QUANTITÉ D'ACIDES FULVIQUES ET HUMIQUES DANS LES SOLS NOIRS (tabl. 1)

Ils ont été extraits par le pyrophosphate Na et leur signification a été précisée par CARBALLAS *et al.* (1967) et DUCHAUFOUR et SOUCHIER (1968). Nous vérifions d'après les résultats consignés dans le tableau 1 que les acides fulviques représentent environ 10 à 20 p. 100 de la matière organique totale des sols noirs, et que le rapport AF/AH est compris entre 0,6 et 1,5, ce qui, d'après les auteurs cités est caractéristique des sols bruns acides, les types ocres podzoliques étant marqués par des teneurs généralement plus élevées.

III. — DÉTERMINATION DE L'ALUMINIUM LIBRE DANS PLUSIEURS HORIZONS DES PROFILS (tabl. 2)

DUCHAUFOUR et SOUCHIER (1965 à 1968), ont souligné tout l'intérêt de l'évaluation quantitative de l'Al libre qui, selon eux, « fournit le meilleur indice de podzolisation », alors que l'Al échangeable ne fournit que peu d'informations.

TABLEAU 2

Complexe absorbant et éléments minéraux des sols de Saint-Amand-le-Petit - Peyrat-le-Château

Échantillon	Horizon	pH-H_2O	S/T	C/N	Argile %	Fe libre °/oo	Al libre °/oo réactif TAMM	Al libre °/oo réactif combiné
11	A_{1-1}	5,3	25	11,7	17,0	10,6	6,4	17,0
12		5,1	11,8	11,5	13,7	10,2	8,6	16,5
13	A_{1-2}	4,9			13,2	9,3	8,6	14,4
14	(B) C	5,1			12,7	8,4	4,8	7,4
21	A_1	4,8	7,1	13,2	12,2	5,3	4,8	6,0
22	(B)	4,9	2,7	14,2	15,5	7,0	3,2	5,1
23	C	4,9			8,2	4,4	2,8	3,6
11-1	A_0A_1	4,7	10,7	14,6	11,2	7,3	9,2	13,2
11-2	A_{1-2}	4,7	4,8	14,8	9,2	7,3	6,6	12,2
11-3	(B)	4,7	13,2	15,1	7,0	6,6	6,4	9,2
11-4	C	4,7			7,7	3,5	3,0	2,8
20-1	A_{1-1}	4,6	18,6	10,5	10,2	5,5	2,0	3,3
20-2	A_{1-2}	4,5	4,7	9,4	9,5	6,8	2,5	3,7
20-3	(B)	5,2			11,7	6,8	3,0	4,3
35-1	A_{1-1}	4,5	6,9	18,9	12,1	8,0	6,9	9,8
35-2	A_{1-2}	4,9	9,1	18,8	12,0	6,7	5,3	7,8
35-3	(B_{1-1})	4,9	17,4	18,5	11,8	6,4	4,8	7,0
35-4	(B_{1-2})	5,2	28,0	17,1	11,8	5,0	3,8	5,8
35-5	C	5,1	29,5		11,3	4,0	2,7	4,1

Nous avons donc procédé, en plus des estimations classiques des teneurs en argile et en fer libre (technique de DEB) des divers horizons de quelques profils, à la détermination de l'Al libre. A cet égard, deux processus ont été mis en œuvre : le réactif de TAMM, composé d'acide oxalique et d'oxalate d'NH_4 (DUCHAUFOUR et SOUCHIER, 1966) qui extrait les formes amorphes d'hydroxyde d'Al, et le réactif combiné constitué du réactif de TAMM additionné d'hydrosulfite de Na, qui extrait en outre les formes paracristallines. Tous les résultats sont consignés dans le tableau 2. Ils intéressent 5 profils : 4 sols noirs et un seul sol brun acide classique en domaine cristallin établi sur colluvions granitiques.

Dans notre publication de 1968, nous avions déjà souligné l'absence d'entraînement de l'argile et du fer libre dans les profils d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château. Au contraire, ces valeurs diminuent régulièrement depuis les horizons A jusqu'à l'arène C à l'exception, toutefois, de deux situations (profils 2 et 20) où le coefficient d'entraînement en (B) ne dépasse par 1,3.

Les valeurs de l'Al libre ont un comportement tout à fait identique à celles de l'argile et du fer libre. On ne constate pas d'entraînement de cet élément le long des profils, l'horizon (B) étant toujours moins richement pourvu que les horizons A, à l'exception encore du même profil 20. D'ailleurs, et ceci constitue un excellent critère de présence de sols bruns acides, les teneurs en Al libre sont très faibles pour les profils 2, 20 et 35, un peu plus élevés pour les profils 1 et 11. Il ne semble pas qu'il y ait « cryptopodzolisation » dans ce secteur de Haute-Vienne, comme dans un certain nombre de sols des Vosges décrits par DUCHAUFOUR et SOUCHIER (1966 à 1968). Al forme ici des complexes liés à la matière organique, puisqu'ils diminuent régulièrement avec les taux de cette matière organique.

A titre de comparaison, et pour faciliter des travaux de corrélation ultérieurs nous avons jugé intéressant d'étudier également l'Al échangeable. Tout en ne constituant vraisemblablement pas un critère aussi valable que l'Al libre, l'Al échangeable peut mettre en évidence des caractères particuliers de certains types de sols.

Comme LEFEBVRE-DROUET (1967) dans le cas de sols acides du Morvan, nous avons pu établir une première corrélation entre la quantité de matière organique totale évaluée en p. 100 de terre sèche et les valeurs de Al échangeable, extrait suivant la technique de YUAN (1959), obtenues après destruction de la matière organique. Elle s'exprime par la droite de régression $y = 3{,}25\ x + 4{,}34$ et la corrélation ($r = 0{,}986$) est très forte et hautement significative, même pour $P = 0{,}001$ entre les 2 variables. Notons aussi que cette forme d'Al peut-être liée aussi bien aux acides fulviques qu'aux acides humiques, comme à la somme de ces deux constituants, car il existe entre ces variables des corrélations toujours positives et hautement significatives pour $P = 0{,}001$. Elles se traduisent par les trois droites de régression suivantes :

1) AF p. 1 000 — Al échangeable..... : $y = 5{,}7\ x + 1{,}1$ ($r = 0{,}889$)
2) AH p. 1 000 — Al échangeable..... : $y = 5{,}16\ x + 3{,}5$ ($r = 0{,}975$)
3) AF + AH p. 1 000 — Al échangeable : $y = 2{,}83\ x + 1{,}5$ ($r = 0{,}954$)

CONCLUSIONS

Les sols de la région d'Eymoutiers Peyrat-le-Château apparaissent en définitive assez singuliers, leur classification s'avérant particulièrement délicate.

Il existe, en effet, une discordance accusée entre les observations morphologiques qui tendraient à faire soupçonner une évolution de type ocre-podzolique par la présence en particulier d'un horizon (B) de couleur ocre, et l'étude détaillée du profil grâce aux examens analytiques. Ces derniers ne confirment pas l'impression recueillie sur le terrain, car on ne constate aucun entraînement du fer libre et surtout de l'Al libre le long des profils.

En conséquence, si l'on se base sur la classification proposée par la C. P. C. S. (1963-1967), ces sols noirs ne paraissent pas devoir être rangés parmi les types ocre-podzoliques, mais ils seraient plutôt à rattacher aux sols bruns acides, à mull-moder, avec un horizon (B) « cambique » et très riches en humus. Ils seraient ainsi proches de certains sols du Massif central déjà décrits par DUPUIS et HOREMANS (1966), notamment sur le granite de Guéret.

Reçu pour publication en août 1969.

SUMMARY

BLACK SOILS, WITH A HIGH PERCENTAGE OF ORGANIC MATTER, ON LEUCOGRANITES IN THE AEREA OF EYMOUTIERS-PEYRAT-LE-CHATEAU (HAUTE-VIENNE, FRANCE).

The study of the black soils of the Eymoutiers-Peyrat-le-Château area (Haute-Vienne), already described in a previous paper, has been acheved by 3 new determination :

1. a micromorphological examination of a typical profile;
2. analyses of the fulvic and humic acids contained in the organic matter;
3. a determination of free Al in several horizons in order to follow its evolution along the profiles;

The results have led us to modify our earlier opinion regarding the place of these soils in the classification, where, following their morphological examination, they were included among the ochre-podzolic types. As a matter of fact no leaching of plasma elements, nor of free iron or free aluminium along the profiles studied having been observed, they can no more be classified in included among the acid brown mullmoder soils, and would represent their humiferous facies.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE SCHWARZEN, AN ORGANISCHER SUBSTANZ REICHEN, AUF LEUKOGRANITEN RUHENDEN BÖDEN IM GEBIET VON EYMOUTIERS)PEYRAT-LE-CHATEAU (HAUTE-VIENNE)

Die in einemersten Artikel beschriebene Untersuchung der schwarzen Böden im Gebiet von Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute-Vienne) wurde durch 3 Serien neuer Bestimmungen ergänzt :

1. Mikromorphologische Untersuchung eines typischen Profils.
2. Analysen der in der organischen Substanz ent- haltenen Fulvo- und Humussäuren.
3. Bestimmung des freien Al in mehreren Horizonten, um seine Evolution längs der Profile zu verfolgen.

Diese Ergebnisse führen zu einer Abänderung des im ersten Teil eingenommenenStandpunktes, was die Stellung dieser Böden in der Klassifizierung betrifft, wo sie nach einer morphologischen Untersuchung unter den Ocker-podzolichen Typen erschienen. Da keine Auslagung

von Plasmabe-standteilen, noch von freiem Eisen und Aluminium, längs der untersuchten Profile, festgestellt wurde, könenn sie nicht mehr in der vorgeschlagenen Gruppe verbleichen. Es scheint, dass sie eher den sauren braunen Mull-Moder-Böden anzureihen wären, der en humus haltiger-Fazies sie vertreten.

РЕЗЮМЕ

Черноземы богатые органическим веществом залегающие на леуко-гранитах района Зймутье — Пэйра-ле-Шато (Верхняя Вьена).

Добавочная заметка.

ЖК. ДЭЖУ, Ж. ГЮЙЙО, Ж. МОРИЗЭ, М. ЖАМАНЬ.

Изучение черноземов расположенных в районе Эймутье — Пэйра-ле-Шато, уже описанных в пред идушей работе, дополняется тремя сериями новых определений :

1. Микроморфологическим изучением типичного профиля;

2. Анализом фульво-кислот и гуминовых кислот органического вещества этих почв;

3. Определением свободного алюминия в нескольких горизонтах, чтобы проследить эволюцию этого элемента по всему протяжению профилей;

Полученные результаты заставляют авторов изменить их первоначальную точку зрения в отношении места отведенного этим почвам в классификации почв : сначала, по морфологическом их изучении, почвы эти были причислены к категории бурых, оподзоленных почв. Но в виду того что не было отмечено ни вымывания элементов плазмы, ни присутствия свободных железа и алюминия на всем протяжении изучавшихся профилей, становится необходимым изменить первоначально предложенную классификацию. Авторы полагают что почвы эти могут быть причислены к кислым коричневым почвам с мулль-модером, гумусоносную фракцию которых они должно-быть и представляют.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BREWER R. 1964. *Fabric and mineral analysis of soils.* John Wiley and Sons, Inc. New York, London, Sidney.

CARBALLAS T., DUCHAUFOUR Ph., JACQUIN F., 1967. Évolution de la matière organique des rankers. *Bull. Éc. nat. sup. agron. Nancy*, 1, 19-28.

DEJOU J., GUYOT J., MORIZET J., 1968. Juxtaposition de sols noirs, très riches en matières organiques et de sols bruns acides sur leucogranites dans la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Hte-Vienne). *Ann. agron.*, **19**, 5, 511-539.

DUCHAUFOUR Ph., 1967. La podzolisation en climat atlantique. *An. Edafol. Agrobiol.*, **26**, 1-4, 242-258.

DUCHAUFOUR Ph., SOUCHIER B., 1965. Note sur un problème de classification. Podzolisation chimique et différenciation du profil. *Pédologie*, **15**, 2, 143-158.

DUCHAUFOUR Ph. SOUCHIER B., 1966. Note sur une méthode d'extraction combinée de l'aluminium et du fer libre dans les sols. *Sci. Sol*, nº 1, 17-29.

DUCHAUFOUR Ph., SOUCHIER B., 1968. Note sur la migration sélective de l'aluminium dans les sols cryptopodzoliques. *C. R. Acad Sci, sér. D*, **3**, 266, 204-206.

DUPUIS J., HOREMANS P., 1966. Observations sur quelques sols du Massif central. *Ann. Inst. nation. agron.*, **4**, 318-375.

LEFEBVRE-DROUET Élisabeth, 1967. Sur l'aluminium complexé à la matière organique dans divers sols acides. *C. R. Acad. Agric.*, **53**, 12, 926-932.

YUAN T. L., 1959. Détermination of exchangeable hydrogen in soils by a titration method. *Soil Sci.*, **88**, 164-167.

XXX, 1960. *Soil classification.* A comprehensive system, *7th Approx. Soil Survey Staff*, Soil Conservation Service, U. S. D. A.

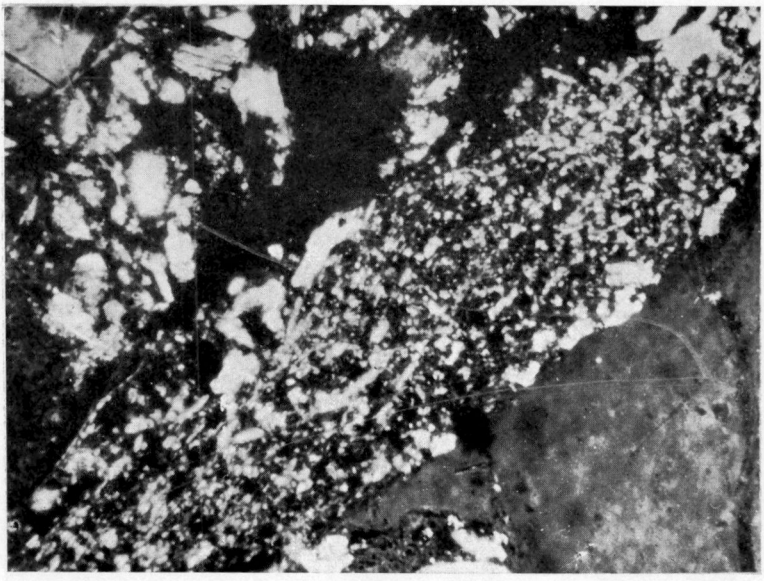


FIG. 1. — *Arène granitique*

Fragments de feldspaths indépendants. — Localisation préférentielle de petits fragments phylliteux en bordure d'un gros grain de quartz. — Lumière polarisée × 70.

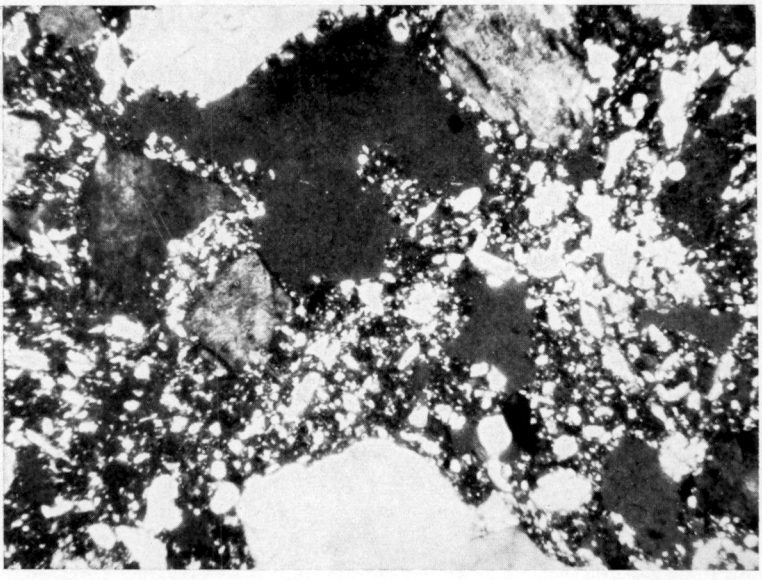


FIG. 2. — *Horizon B*

Squelette et « plasma » très hétérogènes. — Micro-division et redistribution des fragments phylliteux, localement organisés en surface des quartz et débris de feldspaths. — Lumière polarisée × 70.

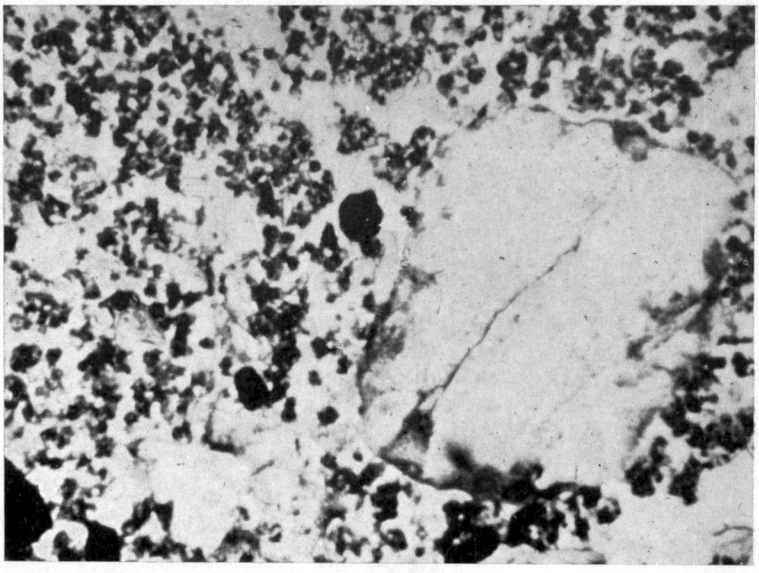


FIG. 3. — *Horizon A*

Aspect aggloméré caractéristique des horizons à tendance mull acide. — Quelques débris de matière organique non humifiée. — Lumière naturelle × 70.

Ann. agron., 1969, **20** (5), 527-538.

NOTE ANALYTIQUE

SUR LE MICRODOSAGE COLORIMÉTRIQUE DU COBALT DANS LES VÉGÉTAUX : INTERFÉRENCE DU FER, CONTAMINATIONS PAR LA TERRE

Éliane MORÉ

Station d'Agronomie, 29 S - Quimper
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La méthode utilisée consiste en la classique colorimétrie au sel nitroso-R après séparation du complexe cobalt α-nitroso-β-naphtol.

Des précisions sont apportées sur la phase de la destruction nitroperchlorique de ce complexe, puis sur la température optimale de calcination. L'interférence du fer sur les résultats de la colorimétrie a été mesurée en solution pure, puis en présence d'une solution synthétique contenant les minéraux d'un foin. Dans de nombreux cas (ray-grass, maïs, choux) la teneur en fer de la matière sèche est suffisamment élevée pour perturber le dosage du cobalt. Une solution satisfaisante consiste en une élimination de la majeure partie du fer présent dans la solution chlorhydrique de reprise des cendres, grâce à une extraction à l'éther isopropylique, rendant ainsi la méthode générale.

Les foins étant toujours souillés par une certaine quantité de terre, nous précisons l'importance des erreurs ainsi occasionnées.

INTRODUCTION

Nous dosons le cobalt, dans les végétaux, selon la méthode de MAGNY, CABROL et CARLES (1961). Le cobalt est extrait de la solution de reprise chlorhydrique des cendres par le chloroforme sous forme de complexe cobalt α-nitroso-β-naphtol. Après minéralisation de cet extrait, il est dosé colorimétriquement par le sel nitroso-R.

La première partie de cette note se rapporte à la méthode analytique ; nous y précisons quelques points du mode opératoire et étudions l'interférence provoquée par le fer.

Nous avons constaté, en outre, que le dosage du cobalt dans les végétaux et plus particulièrement dans les foins, risque d'être faussé du fait de contaminations par la terre. Dans la seconde partie, nous essayons d'évaluer l'erreur ainsi commise.

Nous décrivons enfin, en détail, la technique utilisée.

A. — MÉTHODE ANALYTIQUE

1. *Remarques sur le mode opératoire*

a) *Température de calcination.*

Nous avons étudié l'influence de la température de calcination sur les résultats du dosage. Le tableau 1 montre qu'aux erreurs d'expérience près, ces résultats sont identiques aux trois températures considérées : 550°, 650° et 750°C. A 550°, le résidu de carbone est encore très important ; à 750°, nous avons observé, pour certains échantillons, un début de fusion. Nous avons donc adopté la température de 700°C. Nous calcinons 20 g de matière sèche, dans une capsule de porcelaine de 10 cm de diamètre, au moufle électrique à 700°C environ, après montée progressive de la température.

TABLEAU I

Influence de la température de calcination sur le dosage du cobalt

	Teneur en Co exprimée en p.p.m.		
	550°	650°	750°
Ray-grass stade pâture I	0,036*	0,036	0,040
Ray-grass stade pâture II	0,055	0,055	0,055
Ray-grass stade pâture III	0,105	0,105	0,105
Ray-grass stade foin	0,042	0,042	0,050

* Chaque valeur est la moyenne de 4 dosages.

b) *Minéralisation de l'α-nitroso-β-naphtol après extraction du complexe.*

La destruction nitroperchlorique de l'α-nitroso-β-naphtol est difficile et doit se faire, dès le début, à température élevée pour être complète. Nous effectuons l'attaque sur bain de sable à gaz, très chaud (350° environ) et la poursuivons jusqu'à décoloration totale de l'extrait ; la moindre teinte résiduelle fausserait, par excès, la lecture finale. La minéralisation complète demande environ 6 heures.

c) *Contrôle de la méthode par addition de cobalt.*

Des quantités connues de cobalt ajoutées à un ray-grass sous forme de solution de chlorure de cobalt : $CoCl_2$, 6 H_2O (sel à partir duquel est préparée la gamme étalon) ont été retrouvées avec une bonne précision :

Cobalt ajouté (γ).....	0	1	2	3	4
Cobalt dosé dans le ray-grass (γ)	1,4	2,4	3,3	4,5	5,2

Chaque résultat représente la moyenne de six dosages.

2. Interférence du fer

Divers auteurs (SALTZMAN, 1957 ; WISE, 1954) ont précisé que le fer ne gêne pas le dosage du cobalt à condition qu'il n'y ait pas, dans la solution, plus de 1 000 γ de fer pour 1 γ de cobalt. Les ray-grass que nous avons analysés contiennent, pour la plupart, de 0,02 à 0,3 p.p.m. de cobalt. En ce qui concerne le fer, les teneurs se situent entre 25 et 300 p.p.m. Ainsi, le rapport Fe/Co atteint et dépasse souvent 1 000. Soixante-dix échantillons, pris au hasard, se répartissent de la façon suivante par rapport à la valeur de Fe/Co :

	Fe/Co < 1 000	: 50 p. 100	des échantillons
1 000 <	Fe/Co < 1 500	: 30 p. 100	—
1 500 <	Fe/Co < 2 500	: 12 p. 100	—
2 500 <	Fe/Co < 3 500	: 8 p. 100	—

Il nous a paru nécessaire, dans ces conditions, de préciser l'influence de cet élément.

Nous avons ajouté des quantités croissantes de fer, sous forme de chlorure ferrique, à des gammes-étalons de cobalt, gammes préparées, d'une part, dans l'eau distillée, d'autre part, dans une solution contenant les principaux cations d'un foin. La préparation de cette solution synthétique est donnée ci-dessous :

Pour 2 litres de solution, dissoudre dans 200 ml d'HCl 6 N :

$(NH_4)_2\ HPO_4$	10,6 g
$CaCl_2$, 2 H_2O	22 g
$MgSO_4$, 7 H_2O	13 g
NaCl.....	7,6 g
KCl	28,6 g
$MnSO_4$, H_2O	368 mg
$CuSO_4$, 5 H_2O	15,6 mg

Compléter à 2 litres avec de l'eau distillée. Deux litres de cette solution correspondent à 1 kg de foin sec contenant :

P.....	2,5 g
Ca	6 g
Mg	1,3 g
Na	3 g
K	15 g
Mn	120 mg
Cu.....	4 mg

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 2 où chaque valeur représente la moyenne de 3 dosages.

TABLEAU 2

Influence du fer sur le dosage du cobalt

A : gamme dans l'eau distillée

B : gamme dans la solution synthétique de foin

Co (γ)	Cobalt dosé en γ							
	Fe/Co : 500		Fe/Co : 1 000		Fe/Co : 2 000		Fe/Co : 4 000	
	A	B	A	B	A	B	A	B
0,5			0,51	0,50	0,52	0,54	0,60	0,54
1,0	0,98	1,04	1,02	1,04	1,20	1,16	1,45	1,26
2,0	1,90	2,08	2,05	2,08	2,20	2,24	2,45	2,40
4,0	3,93	4,00	4,10	4,10	—	—	—	—

L'examen de ce tableau nous montre, qu'effectivement, pour un rapport Fe/Co égal ou supérieur à 1 000, en solution pure comme en solution synthétique de foin, l'influence du fer est sensible, et ceci d'autant plus que la quantité absolue de fer est plus forte.

Pour un rapport Fe/Co égal à 1 000, les résultats sont déjà entachés d'une erreur, par excès, sensible pour 2 et 4 γ de cobalt. L'erreur par excès est de l'ordre de 10 p. 100 pour le rapport 2 000 et de l'ordre de 20 p. 100 pour le rapport 4 000.

Il convient de signaler que des quantités non négligeables de fer risquent d'être apportées lors du broyage de l'échantillon, selon le type de broyeur utilisé. Avec un broyeur en fonte, type broyeur à marteaux, nous avons mesuré des surcharges de fer de l'ordre de 50 p.p.m., mais atteignant parfois 100 p.p.m.

Voici quelques exemples se rapportant aux ray-grass qui ont spécialement été étudiés dans ce travail. Nous savons que, récoltés en sol granitique, ces ray-grass seront moins riches en cobalt que récoltés en sol schisteux (COPPENET et CALVEZ, 1967), d'où possibilités plus grandes d'interférence du fer.

Ray-grass au stade épiaison récoltés en région granitique (20 échantillons).

Moyenne des teneurs en Co ..... 0,03 p.p.m.
Moyenne des teneurs en Fe ..... 39 p.p.m.

Douze échantillons sur 20 contenant 0,02 p.p.m. de Co (limite inférieure de validité de notre méthode) et toutes les teneurs en Fe étant supérieures à 20 p.p.m., tous ces résultats seront faussés par excès dans des proportions voisines de 10 p. 100 (rapport Fe/Co [1] voisin de 2 000).

Ray-grass au stade épiaison récoltés en région schisteuse (23 échantillons).

Moyenne des teneurs en Co ..... 0,07 p.p.m.
Moyenne des teneurs en Fe ..... 38 p.p.m.

Le rapport Fe/Co étant inférieur à 1 000, il n'y a pas d'interférence sauf dans deux cas où la teneur en Co est égale à 0,02 p.p.m.

Ray-grass au stade pâture.

Les teneurs en fer vont de 60 à 200 et parfois 300 p.p.m., ce qui implique une interférence pour toutes les teneurs en cobalt inférieures à 0,06 p.p.m.

Quelques échantillons de maïs et de choux fourragers ont été analysés également :

Maïs (parties aériennes) : 12 échantillons.

Teneurs en cobalt faibles : inférieures à 0,02 p.p.m. pour 7 échantillons, comprises entre 0,03 p.p.m. et 0,04 p.p.m. pour les 5 autres.

Teneurs en fer : moyenne de 88 p.p.m. Tous les résultats sont faussés (rapport Fe/Co [1] compris entre 2 000 et 4 000).

Choux fourragers (7 échantillons).

Moyenne des teneurs en Co ..... 0,045 p.p.m.
Moyenne des teneurs en fer ..... 87 p.p.m.

Le rapport Fe/Co [1] varie de 1 200 à 2 600 : tous les résultats sont faussés.

B. — CONTAMINATION DES FOURRAGES PAR LA TERRE

Les dosages effectués sur plusieurs échantillons d'un même ray-grass, au stade pâture, donnent des résultats très voisins ; l'écart observé entre les lectures représente ordinairement moins de 0,025 γ de cobalt par ml (maximum de 2 divisions, en cuves de 3 cm, spectrophotomètre Jean et

[1] Dans les cas où Fe gêne le dosage, la valeur du rapport Fe/Co est en réalité encore supérieure à celle calculée ici d'après la teneur apparente en cobalt, supérieure à la teneur réelle.

Constant). Le coefficient de variation pour une série de 12 dosages est de 4,9 p. 100. Nous avons constaté, par contre, une plus grande variabilité des résultats dans les analyses de ray-grass ; au stade foin, nous obtenons un coefficient de variation de 11,8 p. 100. Nous pensons que les contaminations par le sol, au cours de la dessiccation et de la mise en bottes du foin à la ferme, sont une cause d'erreur. STANTON et KIDSON (1939) soulignent qu'il est très difficile d'obtenir des échantillons de fourrages exempts de terre et que, celle-ci étant beaucoup plus riche en cobalt que la plante, l'influence de ces contaminations est loin d'être négligeable. MCNAUGHT et PAUL (1939) précisent qu'il n'est pas exceptionnel d'avoir des échantillons souillés par la terre dans des proportions atteignant quelques grammes pour 100 g de matière sèche. D'après les estimations que nous avons faites, nous ne pensons pas avoir de contaminations de cette importance, mais il semble qu'elles soient fréquemment de l'ordre de 1 g de terre par kilogramme de foin ; pour les foins les plus sales, elles atteindraient 3 à 5 g par kilogramme.

Pour déterminer l'erreur occasionnée par cet apport de terre, nous avons, d'une part, dosé le cobalt et le fer extraits des sols par l'acide chlorhydrique au 1/4 (acide utilisé pour la reprise des cendres) et, d'autre part, analysé des échantillons de ray-grass au stade pâture après addition de quantités connues de terre.

1. *Cobalt et fer extraits des sols par HCl au 1/4*

Les dosages ont porté sur 40 couches arables de sols, 17 granitiques et 23 schisteux.

Sols granitiques.

Cobalt : moyenne de 2,15 p.p.m. — extrêmes : 1 — 4,5 p.p.m.
Fer : moyenne de 1,1 p. 100 — extrêmes : 0,7 — 1,95 p. 100

Sols schisteux.

Cobalt : moyenne de 9,8 p.p.m. — extrêmes : 6,4 — 13,3 p.p.m.
Fer : moyenne de 2,35 p. 100 — extrêmes : 1,6 — 3,5 p. 100

D'après ces résultats, en prenant les valeurs moyennes, nous constatons qu'un gramme de terre dans un kilogramme de foin apporte :

0,002 p.p.m. de cobalt, 11 p.p.m. de fer, s'il s'agit d'une terre granitique,
0,01 p.p.m. de cobalt, 23 p.p.m. de fer, s'il s'agit d'une terre schisteuse.

2. *Cobalt dosé dans du ray-grass, au stade pâture, après addition de quantités connues de terre*

Nous avons ajouté de la terre dans la proportion de 1, 3 et 5 p. 1 000 à deux ray-grass : A (teneur initiale, 0,094 p.p.m. de Co) et B (0,085 p.p.m.). Les résultats des dosages de cobalt sont reproduits dans le tableau 3.

Nous constatons, comme le laissaient prévoir les résultats des analyses de terres ci-dessus, que l'erreur due aux contaminations par la terre peut être importante, surtout dans le cas d'une terre schisteuse. Par exemple, la teneur en cobalt du ray-grass A passe de 0,094 p.p.m. à 0,105 p.p.m. pour une contamination de 1 p. 1 000 par la terre T_1 et à 0,125 p.p.m. pour une contamination de 3 p. 1 000. Le cobalt dosé dans le ray-grass, après addition de terre, correspond sensiblement à la teneur calculée à partir des quantités de cobalt extraites des terres par HCl au 1/4. La différence observée peut s'expliquer par l'influence du fer. En effet, le fer extrait des sols, ajouté au fer contenu dans le ray-grass, augmente les risques d'interférence de cet élément. La terre fausse le dosage par excès surtout par son propre cobalt, mais également, dans de nombreux cas, par son fer.

Prenons comme exemple le ray-grass B. Il contient 66 p.p.m. de fer, 0,085 p.p.m. de cobalt. Fe/Co est voisin de 800. Un apport de terre T_4 dans la proportion de 3 p. 1 000 provoque une élévation du taux de fer de 60 p.p.m. du taux de cobalt de 0,025 p.p.m. Le rapport Fe/Co = 126/0,110 est alors voisin de 1 100. L'influence du fer devient sensible.

TABLEAU 3

Influence des souillures de terre

Ray-grass A — teneur initiale : 0,094 p.p.m. de Co
Ray-grass B — teneur initiale : 0,085 p.p.m. de Co

		Cobalt extrait de la terre par HCl 1/4 (p.p.m.)	Fer extrait de la terre par HCl 1/4 (p. 100)	Quantité de terre apportée (g par kg de ray-grass)								
				1 g			3 g			5 g		
				Co apporté (p.p.m.)	Co calculé	Co dosé	Co apporté	Co calculé	Co dosé	Co apporté	Co calculé	Co dosé
A (0,094)	+ Terre 1 schiste	9,5	1,8	0,009	0,103	0,105	0,028	0,122	0,125	0,047	0,141	0,150
	+ Terre 2 schiste	8,0	1,85	0,008	0,102	0,105	0,024	0,118	0,125	0,040	0,134	0,140
B (0,085)	+ Terre 3 granite	3,8	1,2	0,004	0,089	0,090	0,011	0,096	0,095	0,019	0,104	0,100
	+ Terre 4 schiste	8,3	2,0	0,008	0,093	0,090	0,025	0,110	0,115	0,041	0,126	0,140

La technique décrite plus loin, qui supprime l'interférence du fer, permet d'éliminer cette dernière cause d'erreur et de rattacher les erreurs par excès aux seuls apports de cobalt par la terre, ce qui peut néanmoins fausser encore les résultats par excès dans une proportion de l'ordre de 30 p. 100.

C. — ÉLIMINATION PRÉALABLE DU FER PRÉSENT PAR EXTRACTION A L'ÉTHER ISOPROPYLIQUE

Pour supprimer les risques d'interférence du fer et rendre ainsi la méthode générale, nous proposons l'élimination de la majeure partie de cet élément dans la solution de reprise des cendres par une extraction à l'éther isopropylique précédant la phase de formation du complexe.

Cette méthode de séparation de Fe (III), en milieu chlorhydrique concentré, a été proposée par DODSON (cité par SANDELL, 1944) et utilisée dans le dosage du cobalt par divers auteurs (THIERS, WILLIAMS et YOE, 1955 ; WISE et BRANDT, 1954).

C'est en milieu chlorhydrique de concentration 8 M que l'extraction est la meilleure. Nous l'avons vérifié en opérant sur des solutions de concentrations différentes, contenant chacune 6 000 γ de fer.

Après une extraction (40 ml d'éther pour 50 ml de solution), les quantités de fer dans chaque solution étaient les suivantes :

Concentration de la solution en HCl ...	6 M	7 M	8 M	9 M
Fer (γ) restant après l'extraction	2 840	820	140	490

Cette extraction par l'éther isopropylique permet d'éliminer suffisamment de fer pour que le dosage du cobalt ne soit plus faussé. Le pourcentage de fer extrait augmente avec la concentration en fer de la solution et varie de 90 à 97 pour des quantités de fer comprises entre 500 et 6 000 γ (tabl. 4). Les teneurs en fer des végétaux analysés se situent entre 25 et 300 p.p.m. ; les dosages de cobalt étant effectués sur 20 g de matière sèche, ces limites sont celles des quantités de fer contenues dans les 50 ml de solution chlorhydrique des cendres.

TABLEAU 4

Quantités de fer extraites en fonction de la concentration en fer de la solution

Milieu chorhydrique : 8 M,
Volume de la solution : 50 ml,
Extraction du fer par 40 ml d'éther isopropylique

Fer dans la solution (γ)	Fer restant après extraction	Fer extrait (γ)	Pourcentage de fer extrait
500	54	446	89,2
1 000	56	944	94,4
2 000	72	1 928	96,4
4 000	128	3 872	98,8
6 000	164	5 836	97,2

Après extraction il reste, au plus, dans la solution, 10 p. 100 de la quantité de fer préexistante. Le rapport Fe/Co sera donc au moins divisé par 10. Dans les cas les plus défavorables, nous avons eu des rapports Fe/Co de l'ordre de 4 000 ; ils deviendront, grâce à cette séparation du fer, inférieurs ou égaux à 400 et l'influence du fer ne sera plus sensible.

Nous avons vu que l'extraction doit s'effectuer en milieu chlorhydrique de concentration 8 M. Nous utilisons donc, pour la reprise des cendres, non plus de l'acide 3 M bouillant, comme dans la méthode originale, mais de l'acide 8 M que nous chauffons à 70° environ. Ces deux modes de reprises nous donnent des résultats identiques dans le dosage du cobalt effectué sur un ray-grass au stade épiaison.

Reprise acide bouillant 3 M	Reprise acide 70° 8 M
0,208 p.p.m. (1)	0,209 p.p.m. (1)

(1) Chaque valeur est la moyenne de six dosages. L'élimination du fer n'a pas été faite au cours de ces dosages car il s'agissait uniquement de comparer les deux modes de reprise des cendres.

Nous avons, par ailleurs, vérifié que l'extraction à l'éther n'entraîne pas de perte de cobalt. Des quantités connues de cobalt ajoutées à un raygrass ont été retrouvées avec une précision identique à celle mentionnée plus haut (§ A_1).

Cobalt ajouté (γ).....	0	1	2
Cobalt dosé dans le ray-grass (γ) ..	1,36*	2,34*	3,28*

* Chaque valeur est la moyenne de 4 dosages.

Cette manipulation supplémentaire n'est pas longue et garantit une parfaite élimination des interférences dues au fer. Voici le mode opératoire complet actuellement suivi.

D. — TECHNIQUE PROPOSÉE POUR LE DOSAGE DU COBALT PAR LE RÉACTIF NITROSO-R

Réactifs

— Acide chlorhydrique pur, $d = 1{,}18$.
— Acide chlorhydrique 8 M : 600 ml d'acide pur concentré pour 900 ml de solution aqueuse,
— Acide chlorhydrique M : 85 ml d'acide pur concentré pour 1 litre de solution,
— Éther isopropylique,
— deux solutions aqueuses de citrate de sodium (environ 300 g par litre) de pH 5,2 et 8,5 : le pH est ajusté par addition d'acide citrique ou de soude,
— solution d'α-nitroso-β-naphtol à 2 p. 100 dans l'acide acétique pur,
— alcool isoamylique pour analyses,

— chloroforme pour analyses,

— acide nitrique pour analyses,

— acide perchlorique pour analyses,

— réactif nitroso-R : pour 100 ml, ajouter à 70 ml d'eau : 20 ml de citrate de sodium à pH 8,5, puis 10 ml de sel nitroso-R à 2 p. 100 dans l'eau. Ce réactif se conserve 8 jours à l'obscurité.

— Solution étalon de cobalt à 1 g par litre (E) : dissoudre 4,032 g de chlorure de cobalt $CoCl_2$, 6 H_2O, dans 3 à 5 ml d'acide chlorhydrique dilué. Étendre à 1 litre.

— Solution E/500 à 2 γ par ml. Diluer 500 fois la solution précédente dans l'eau distillée.

Mode opératoire

— Calciner 20 g de matière sèche en capsule de porcelaine de 10 cm de diamètre au moufle électrique à environ 700°C pendant 3 heures, après montée progressive de la température.

— Après refroidissement, ajouter lentement sur les cendres 3 ou 4 ml d'HCl concentré, évaporer à sec sur bain de sable.

— Reprendre par HCl 8 M chaud (70-80°) et filtrer pour éliminer l'insoluble. Recueillir dans un bécher de 100 ml. Effectuer 7 à 8 reprises en utilisant un volume total d'environ 50 ml d'HCl 8 M.

— Introduire le filtrat dans une ampoule à décantation de 250 ml. Rincer avec quelques ml d'HCl 8 M. Ajouter 40 ml d'éther isopropylique et agiter l'ampoule pendant 30 secondes.

— Après décantation, recueillir la solution chlorhydrique dans le bécher utilisé précédemment ; évaporer sur bain de sable. Réduire la température en fin d'évaporation pour éviter les projections.

— Reprendre le résidu sec par 20 ml d'HCl M, chauffer pour bien dissoudre le précipité.

— Introduire la solution dans une fiole de 200 ml, avec 70 ml d'eau dont une partie est utilisée pour les rinçages ; ajouter 20 ml de citrate de sodium à pH 5,2 et 1 ml de la solution d'α-nitroso-β-naphtol. Agiter pour homogénéiser.

— Au bout d'une heure environ, introduire le liquide avec les eaux de rinçage dans une ampoule à décantation de 500 ml ; ajouter 5 ml d'alcool amylique qui facilite la séparation et 15 ml de chloroforme. Agiter vigoureusement pendant 3 minutes. Recueillir la phase chloroformique dans un bécher de 50 ml. Effectuer 2 autres extractions avec 5 ml de chloroforme, en agitant l'ampoule pendant 1 minute.

— Évaporer la solution chloroformique sur bain de sable, au-dessous de 50° pour éviter les pertes par projection.

— Ajouter 5 ml d'HNO_3, 2 ml d'$HClO_4$, recouvrir le bécher d'un verre de montre et porter sur bain de sable très chaud. Après décoloration totale de la solution, au bout de 6 heures environ, évaporer à sec.

Dissoudre le résidu sec dans 1 ml de réactif nitroso-R, verser la solution dans un tube à essais étalonné à 10 ml, rincer plusieurs fois avec de l'eau distillée, compléter à 10 ml. Porter le tube 10 minutes au bain-marie à la température constante de 90°. Ajouter 1 ml d'HNO_3, agiter, porter à nouveau au bain-marie à 90° pendant 10 minutes.

Refroidir rapidement, effectuer la lecture au colorimètre, à 5 100 mμ, au bout de 15 minutes.

CONCLUSIONS

Les tiges et feuilles de végétaux tels que maïs, choux fourragers, ray-grass — particulièrement ceux récoltés sur sols pauvres en cobalt — contiennent souvent plus de 1 000 fois plus de fer que de cobalt. Dans ces conditions, le résultat du dosage de cobalt est faussé par excès d'environ 10 p. 100 pour un rapport Fe/Co de 2 000 et d'environ 20 p. 100 pour un rapport Fe/Co de 4 000. Certains broyeurs en fonte utilisés pour la préparation des échantillons peuvent introduire encore une surcharge de fer, souvent de l'ordre de 50 p.p.m., parfois 100 p.p.m.

Dans le cas des foins prélevés à la ferme, les souillures de terre peuvent fausser aussi par excès les résultats dans des proportions voisines de 30 p. 100. D'un point de vue analytique, ces erreurs sont très importantes ; elles le sont sans doute moins du point de vue de leur signification zootechnique. Des ray-grass récoltés sur sol granitique ou des maïs dont la teneur apparente est de 0,025 p.p.m. peuvent ne contenir en réalité que 0,02 p.p.m. de cobalt. Ces teneurs restent, de toute manière, inférieures au seuil de carence fixé à 0,07 p.p.m. Mais un ray-grass, dont la teneur réelle est 0,06 p.p.m. peut donner, une fois transformé à la ferme en foin toujours plus ou moins souillé par la terre, une teneur apparente de 0,09 p.p.m., soit une teneur supérieure au seuil critique pour les animaux.

L'introduction d'une phase d'extraction à l'éther isopropylique en supplément de la technique habituelle permet l'élimination de la presque totalité du fer. La première cause d'erreur signalée est ainsi supprimée, mais les surestimations dues parfois au cobalt provenant de souillures de terre ne peuvent être évitées et il faudra en tenir compte dans l'interprétation des résultats analytiques.

La séparation du cobalt sur résines sera étudiée, elle remplacerait à la fois l'extraction par l'éther isopropylique et la formation du complexe α-nitroso-β-naphtol et permettrait une simplification des manipulations.

Reçu pour publication en juillet 1969.

SUMMARY

ON THE COLORIMETRIC ESTIMATION OF COBALT IN VEGETABLE MATTER : IRON INTERFERENCE, CONTAMINATION THROUGH THE SOIL

The method for estimating cobalt content is the classic colorimetric analysis, using nitro-R salt after extracting the cobalt-α-nitroso-β-naphthol complex. Research on the effect of iron shows it to be sensitive to a Fe/Co ratio of over 1 000. Colorimetric results are liable to an error in excess of about 10 p. 100 with a ratio of 2 000 and about 20 p. 100 with a ratio of 4 000. The leaves and stalks of maize, cabbages, and rye grass often contain enough iron to upset the proportion of cobalt. It is also possible for certain cast-iron crushers used in preparing the samples to introduce additional iron.

Hay collected from the farm always carries a certain amount of soil on it, and this contamination can falsify results quite considerably, leading to over-estimation of the real cobalt content of vegetable matter.

Such errors are very important from the analytical point of view, and can be equally so from the zootechnical angle, when interpreting the analysis results of plant material whose content approaches the critical threshold of 0.07 p.p.m.

Elimination, by extraction with isopropylic ether, of the greater part of the iron avoids the risk of interference by that element. The extraction is carried out in a solution of recovered ash by hydrochloric acid 8 M.

The method of cobalt estimation is described in full.

ZUSAMMENFASSUNG

ÜBER DIE KOLORIMETRISCHE BESTIMMUNG DES KOBALTS IN PFLANZEN : EINFLUSS DES EISENS, VERUNREINIGUNGEN DURCH GRUND

Die zur Bestimmung des Kobalts angewandte Methode ist das klassische Kolorimetrieverfahren mit Nitroso-R-Salz, nach Auszug des Kobalt-α-Nitroso-β-Naphtol-Komplexes. Der Einfluss des Eisens wurde untersucht und für ein Fe/Co-Verhältnis > 1 000 als empfindlich befunden. Die Ergebnisse der Kilorimetrie enthalten einen übermâssigen Fehler der Grössenordnung von 10 p. 100, bei einem Verhältnis von 2 000 und von 20 p. 100, bei einem Verhältnis von 4 000. Blätter und Stengel von Mais, Kraut und Raygrassenthalten oft genügend Eisen, um die Gewichtsbestimmung des Kobalts zu stören.

Gewisse, zur Vorbereitung der Proben verwendete Mahlwerke aus Gusseisen, können ein Mehrgewicht an Eisen einbringen.

Auf dem Bauernhof entnommenes Heu ist stets mehr oder weniger mit Grund verunreinigt. Diese Kontamination kann in starkem Masse die Ergebnisse verfälschen durch Überschätzung des wirklichen Kobaltgehaltes der pflanzlichen Substanz.

Vom analytischen Standpunkt aus sind solche Fehler sehr schwerwiegend, ebenfalls jedoch vom zootechnischen Standpunkt aus, bei der Auswertung der Analyseergebnisse von Pflanzen, bei denen der Gehalt nahe dem kritischen Schwellwert von 0,07 p.p.m. liegt.

Die Entfernung des grössten Teils des Eisens durch Auszug mit Isopropyläther beseitigt das Risiko einer Beeinflussung durch dieses Element. Der genannte Auszug wird in der durch Aufnahme der Asche mit Salzsäure-8M entstandenen Lösung vorgenommen.

Die vollständige Technik der Kobalt-Dosierung wird beschrieben.

РЕЗЮМЕ

О колориметрическом дозаже кобальта в растениях : интерференция железа, загрязнение почвой.

ЭЛИАНА МОРЭ.

Методика применявшаяся для дозажа кобальта в растениях представляла классическую колориметрию, проведенную в присутствии соли нитрозо-R после экстрагирования комплекса кобальт-α-нитрозо-β-нафтол. Изучалось и влияние железа, оказавшееся довольно чувствительным при соотношении Fe/Co больше 1000. Результаты колориметрии дают ошибку в сторону излишка примерно в 10 % при соотношении 2000, и в 20 % при соотношении 4000. Листья и стебли кукурузы, капусты и райграсса содержат часто достаточно железа чтобы нарушить порядок дозажа кобальта. Некоторые дробилки из чугуна, применяющиеся при изготовке образцов, могут также внести излишек железа.

Образцы сена взятые на фермах всегда более или менее загрязнены землей. Эти загрязнения могут сильно исказить результаты дозажа и вызвать переоценку реального содержания кобальта в растителеном веществе.

Ошибки эти имеют большое значение с точки зрения аналитической; но при оценке результатов анализа растительного материала с содержанием кобальта близким к критическому порогу (0,07 °/₀₀) они играют также крупную роль с точки зрения зоотехнической.

Удаление большей части железа с помощью экстрагирования изопропиловым эфиром упраздняет риск интерференции этого элемента. Экстрагирование производится из растворов золы в соляной кислоте концентрации 8 М.

Автор описывает все технические приемы дозажа кобальта.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COPPENET M., CALVEZ J., 1967. Les oligo-éléments et, en particulier, le cobalt dans les sols et les fourrages du Finistère. *C. R. Acad. Agric.*, 939-947.

MCNAUGHT K. J., PAUL G. W., 1939. Seasonal variation in cobalt content of North Island pastures. *New Zeal. J. Sci. tech.*, **21** B, 95-101.

MAGNY J., CABROL P., CARLES J., 1961. Le dosage du cobalt dans les végétaux. *Ann. Zootech.*, **10** (2), 89-96.

SALTZMAN B. E., KEEMAN R. G., 1957. Microdetermination of cobalt in biological materials. *Meth. bioch. anal.*, **5**, 181-223.

SANDELL E. B., 1944. *Colorimetric determination of traces of metals.* Vol. 3, 28. Interscience publishers, Inc. New York, p. 28.

STANTON D. J., KIDSON E. B., 1939. Cobalt status of soils and pastures in the Sherry and Wangapeka districts, Nelson. *New Zeal. J. Sci. tech.*, **21** B, 65-76.

THIERS R. E., WILLIAMS J. F., YOE J. H., 1955. Separation and determination of millimicrogram amounts of cobalt. *Anal. chem.*, **27**, 1725-1731.

WISE W. M., BRANDT W. W., 1954. Spectrophotometric determination of Co with 2-nitroso-1-naphtol-4 sulfonic acid. *Anal. chem.*, **26**, 693-697.

Ann. agron., 1969, **20** (5), 539-540.

CHRONIQUE DES LIVRES

NISEN (A.). — L'ÉCLAIREMENT NATUREL DES SERRES. — Gembloux (Belgique), éd. J. Duculot, 1969, 198 p.

L'auteur présente son ouvrage comme « le regroupement en une seule publication des divers travaux effectués par lui dans le domaine de l'étude des relations rayonnements-serres ». Quelques chapitres relatifs à des données générales ont été ajoutés afin d'aboutir à un ensemble cohérent.

1. Besoins en lumière des végétaux.
2. Éclairement naturel en Europe occidentale.
3. Éclairement lumineux d'une serre.
4. Transmission du rayonnement par les matériaux.
5. L'effet de serre.
6. L'ombrage des serres.
7. La diffusion de la lumière.

Après un rappel très rapide de l'action de la lumière sur les végétaux, de nombreuses mesures relatives à l'éclairement naturel sont indiquées : rayonnement solaire direct (hauteur maximale du soleil, durée d'insolation,...) rayonnement diffusé par le ciel, influence de la couverture nuageuse... De plus, l'auteur précise dans quelles limites il est possible d'extrapoler les valeurs indiquées à l'ensemble de l'Europe occidentale.

La méthode utilisée pour estimer l'éclairement lumineux dans une serre est exposée dans le chapitre 3. NISEN procède par calcul et, connaissant l'éclairement naturel, il en déduit successivement :

la part qui atteint un abri d'une certaine forme,
la part qui est réfléchie par celui-ci,

pour évaluer l'éclairement effectivement reçu dans différents types de serre et le trajet des différents faisceaux lumineux incidents.

Cette démarche lui permet de mettre en évidence le rôle des caractéristiques optiques des matériaux de couverture, mais aussi celui de la forme de la serre, de son orientation...

L'auteur souligne les difficultés rencontrées pour la normalisation des mesures de transmission des matériaux, aborde le problème du bilan d'énergie des serres (apports et déperditions calorifiques, ombrage) et montre l'importance de la forme de la serre (surface de couverture par rapport à surface protégée).

Enfin, une attention particulière est portée aux rayonnements diffus car, sous serre, au rayonnement diffusé par le ciel et transmis, s'ajoute une quantité importante de lumière diffusée au niveau du matériau de couverture.

Cet ouvrage montre la complexité et l'interdépendance de facteurs tels que : propriétés optiques de matériaux de couverture, forme et orientation des serres qui influent sur le climat à l'intérieur de celles-ci. Il met en garde les personnes chargées de concevoir et d'implanter ces abris contre des conclusions hâtives qui ont pu ou pourraient être déduites de résultats trop partiels.

R. B.

SUTTON (R. F.). — FORM AND DEVELOPMENT OF CONIFER ROOT SYSTEMS. — Oxford, Commonwealth Forestry Bureau, Technical communication nº 7. Farnham Royal, Bucks (England), Commonwealth Agricultural Bureaux, 1969, 131 p.

Cette étude bibliographique constitue le premier essai de synthèse critique de la littérature mondiale sur les systèmes racinaires des Conifères. Une première partie traite de la structure des systèmes racinaires (hétérorhizie, profondeur d'enracinement, mycorrhizes, greffes de racines, etc. Une deuxième partie est consacrée au développement des racines : périodes d'activité, composition des racines, régénération. Enfin, la troisième partie, la plus développée, traite des différents facteurs agissant sur le développement des racines : facteurs édaphiques, compétition, substances de croissance, techniques sylvicoles, organismes du sol.

L'ouvrage comporte une bibliographie de 30 pages.

Ann. agron., 1969, **20** (5), 541.

Note de la rédaction

Les lecteurs des *Annales agronomiques* trouveront ci-dessous cette lettre qui nous est adressée par le Directeur de la Division de la Documentation, de la Législation et de la Bibliothèque de la F. A. O. Il est probable que cette vaste documentation sera susceptible de les intéresser.

« Depuis sa création en 1945, l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture a accumulé, au cours de ses activités mondiales, une somme de renseignements techniques, économiques et sociaux, qui font l'objet de quelques 25 000 publications et documents.

« Il est maintenant possible d'avoir facilement accès à ces renseignements grâce aux services assurée par le Centre de Documentation de la F. A. O. Des index courants et rétrospectifs, ainsi que des bibliographies *ad hoc* préparées sur demande, permettent à l'usager de choisir les documents qui l'intéressent. Ceux-ci sont fournis sous leur forme imprimée ou sous forme de copie ou microcopie. Ces services sont assurés gratuitement ou au tarif minimum.

«Nous souhaiterions faire connaître aussi largement que possible ces services de documentation. Notre expérience à ce jour indique qu'ils répondent à un besoin réel et méritent d'être mieux connus de tous les organismes et particuliers intéressés, et notamment des lecteurs de votre revue. »

Centre de Documentation F.A.O., Siège de la F.A.O.,
Via delle Terme di Caracalla, 00100, Rome (Italie)

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds les dons...; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. Henin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Agronomie.

Le Directeur de la publication: M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 1-1970

Dépôt légal: 1er *trimestre 1969. N° d'impression:* 1569

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 20 1969 NUMÉRO 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exeption des sommaires et résumés

Ann. agron., 1969, **20** (6), 547-564.

REMARQUES GÉNÉRALES SUR L'APPLICATION DE LA SPECTROSCOPIE INFRAROUGE A L'ÉTUDE DES SILICATES

R. PROST

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Après quelques éléments de théorie, on rappelle l'importance de la préparation et du conditionnement des échantillons dans l'étude des silicates, et la façon d'éviter au moins partiellement les difficultés dues à l'effet Christiansen et aux possibilités de résonance Fermi. On aborde ensuite le problème de la décomposition des groupes de bandes non résolues en bandes composantes élémentaires. On donne une solution dans le cas des hydroxyles de la kaolinite.

INTRODUCTION

La spectroscopie infrarouge a surtout été utilisée en chimie organique où elle s'est révélée un moyen d'identification et d'analyse extrêmement fécond. Au fur et à mesure de son développement, son domaine d'application s'est étendu à celui de la chimie minérale et à l'étude des solides. En Agronomie, des tentatives encourageantes ont été faites pour appliquer cette méthode à l'étude de la matière organique (Juste et Delas, 1967), mais on l'utilise le plus souvent pour l'étude des silicates.

Il est possible d'individualiser plusieurs grandes classes dans l'ensemble des silicates suivant la façon dont les tétraèdres SiO^{----}, groupements constitutifs essentiels, sont associés.

On distingue les minéraux à structure fibreuse, phylliteuse ou de tectosilicates suivant que l'association des tétraèdres de silice se fait suivant une, deux ou trois directions.

Dans les minéraux à structure fibreuse, l'association des chaînes de tétraèdres fait apparaître des canalicules. Dans les phyllites, l'association en hexagone des tétraèdres de silice dans deux directions donne la ou les couches tétraédriques.

A cette ou ces couches tétraédriques est toujours associée une couche dite octaé-

drique qui est formée de cations hexacoordonnés, d'une part aux atomes d'oxygène de la couche tétraédrique et, d'autre part à des hydroxyles dont les atomes d'oxygène forment avec les oxygènes de la couche tétraédrique une couche compacte. L'association d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique donne un feuillet Te-Oc ou diphormique. Dans le cas où la couche octaédrique est prise entre deux couches tétraédriques, on a alors un feuillet Te-Oc-Te ou triphormique. De plus, si les cations de la couche octaédrique sont répartis aux sommets d'hexagones, laissant à leur centre une cavité octaédrique libre, on a un minéral dioctaédrique. Il peut être Te-Oc ou Te-Oc-Te. Enfin, si toutes les cavités de la couche octaédrique sont occupées, on a alors un minéral trioctaédrique qui peut être aussi Te-Oc ou Te-Oc-Te.

Les tectosilicates sont formés par l'association de tétraèdres dans les trois directions. Une telle structure donne des cavités de tailles différentes.

La possibilité pour l'aluminium de se substituer au silicium dans des proportions très variables (de $\frac{Al}{Si} = 0$ à $\frac{Al}{Si} = 1$) entraîne un défaut de charge dans le réseau, compensé par des cations situés entre les feuillets. De même la substitution de cations octaédriques par des cations de valence inférieure entraîne aussi des défauts de charge. Les charges négatives que portent les silicates varient beaucoup (de 0 à 250 m.e./100 g). Pour un certain nombre d'entre eux les cations compensateurs situés entre les feuillets sont échangeables même contre des cations organiques (acides aminés à pH acide...).

L'échangeabilité des cations est liée aux propriétés de gonflement de ces minéraux. D'une manière générale, seuls les produits polaires, souvent des produits hydroxylés pénètrent entre les feuillets.

L'étude de ces minéraux, en plus des analyses chimiques, s'effectue par diffraction des Rayons X. C'est un moyen d'identification très commode mais dont le principe même ne permet pas de distinguer des composés appartenant à une même série isomorphe. On complète habituellement cette étude par l'analyse thermopondérale ou l'analyse thermique différentielle qui, tout en étant des méthodes moins fines que la précédente, permettent de lever certaines indéterminations.

On dispose maintenant avec la spectroscopie infrarouge d'une technique supplémentaire qui complète admirablement la diffraction des Rayons X. Cette méthode très fine permet d'atteindre en plus de l'organisation des atomes dans la maille, déterminée par la diffraction des Rayons X, d'autres éléments comme les énergies de liaison des atomes ou encore des renseignements sur la position et les énergies de liaison des protons au squelette. Or on sait le rôle important que jouent les protons dans le comportement physico-chimique des silicates. Ces points sont d'autant plus intéressants qu'ils échappent complètement à une étude par diffraction des Rayons X.

En ce qui concerne les produits adsorbés dans l'espace interfeuillet, la spectroscopie infrarouge semble beaucoup mieux adaptée à l'étude de leur comportement physico-chimique que la diffraction des Rayons X qui ne permet guère jusqu'à maintenant, en plus de la détermination des espaces interfeuillets, que l'établissement de courbes de densité électronique et dans des cas bien particuliers.

Étant donné l'importance croissante de la spectroscopie infrarouge dans l'étude des silicates, il nous a semblé utile de rappeler les éléments théoriques essentiels et d'attirer l'attention sur plusieurs points :

a) la préparation et le conditionnement des échantillons ;

b) les difficultés qui sont dues à la nature cristalline complexe des minéraux étudiés, et à la superposition des spectres du minéral et des produits adsorbés ;

c) les précautions à prendre pour l'exploitation des spectres en particulier dans la décomposition des groupes de bandes non résolues.

I. — RAPPELS THÉORIQUES

Toutes les molécules ou groupement d'atomes, à toutes les températures, y compris au zéro absolu, présentent des mouvements vibrationnels, c'est-à-dire des mouvements au cours desquels les distances et les angles internes de la molécule changent périodiquement sans provoquer aucune translation du centre de gravité ni communiquer un mouvement de rotation à la molécule. Nous allons voir comment ces mouvements vibrationnels sont à l'origine des phénomènes d'absorption infrarouge.

A. — *Étude des modes normaux de vibration*

Les mouvements internes complexes et apparemment apériodiques d'une molécule en vibration, sont le résultat de la superposition d'un certain nombre de mouvements vibrationnels simples, appelés modes normaux de vibration ou vibrations normales de la molécule. On montre qu'un système atomique composé de N atomes possède 3 N-6 (ou 3 N-5 pour les systèmes linéaires) vibrations normales. Chaque mode normal de vibration est caractérisé par des mouvements en phase des atomes constitutifs de la molécule et par une fréquence propre de vibration.

Les déplacements des atomes correspondant à un mode normal de vibration au sein de la molécule ou de la maille cristalline entraînent, s'ils ne sont reliés par aucun élément de symétrie, l'apparition ou la modification du moment dipolaire de la molécule ou du groupement d'atomes correspondant au motif. On appelle cette variation du moment dipolaire, moment de transition. C'est un vecteur.

B. — *Activité des modes normaux en infrarouge*

Lorsque le produit étudié est traversé par un rayonnement électromagnétique du domaine infrarouge, il y a absorption d'une partie de l'énergie de l'onde électromagnétique incidente pour les fréquences qui sont identiques à celles correspondant aux modes normaux de vibration. L'énergie absorbée qui fait passer les molécules d'un niveau d'énergie vibrationnel E'' donné à un niveau supérieur E' est quantifiée et satisfait à l'équation :

$$E' - E'' = h\nu = hc\sigma$$

E' et E'' en ergs
h constante de Planck
ν en s^{-1} est la fréquence de l'onde électromagnétique.
c en cm $\times$ s^{-1} est la vitesse de la lumière
σ en cm^{-1}

Dans le cas où le mode normal de vibration est celui d'une molécule diatomique, la fréquence propre du vibrateur que constitue alors la molécule diatomique est donnée par la formule suivante :

$$\nu = \frac{1}{2\pi c}\sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

ν en cm^{-1} est la fréquence propre du vibrateur,

c en cm $\times$ s^{-1} est la vitesse de la lumière,

k en dyne $\times$ cm^{-1} ou dyne $\times$ rd^{-1} est la constante de force,

μ est la masse réduite du vibrateur formé par l'association des atomes de masse m_1 et m_2 que l'on tire de la formule :

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$$

Ainsi, lorsque la fréquence de l'onde électromagnétique incidente est égale à la fréquence propre du vibrateur, il y a résonance et absorption d'énergie. En fait, il n'y a pas toujours absorption d'énergie, car pour qu'un mode normal de vibration soit actif en infrarouge, c'est-à-dire donne naissance à une bande d'absorption, il faut que le moment de vibration soit différent de zéro.

Il est certain que la notion même de mode normal devient de plus en plus complexe quand le nombre des atomes de la molécule ou de la maille augmente. Ceci ne se traduit pas obligatoirement par un nombre croissant des bandes d'absorption car l'activité des modes normaux est fonction de l'existence du moment de transition donc en définitive du degré de symétrie de la molécule ou de la maille.

Il est possible parfois de tourner cette difficulté en faisant appel à la notion de groupe fonctionnel. En effet, certains groupements d'atomes vibrent à peu près indépendamment du squelette sur lequel ils sont fixés. Les modes normaux sont alors ceux du groupement. C'est le cas de OH, NH_2, CH_2, C = O, etc. Cette notion a surtout été mise à profit dans l'analyse qualitative par spectroscopie infrarouge, mais aussi dans des études plus fines de structures. C'est le cas pour les hydroxyles des silicates.

C. — *Intensité et dichroïsme des bandes d'absorption infrarouge*

L'intensité d'une bande d'absorption infrarouge est proportionnelle au carré de la composante du moment de transition sur le vecteur électrique de l'onde électromagnétique incidente. Si le moment de transition attaché aux molécules contenues dans l'élément de volume dV est également réparti dans toutes les directions de l'espace, l'absorption sera la même quelle que soit la direction de l'onde électromagnétique incidente. Si, au contraire, les moments de transition occupent des directions privilégiées de l'espace, c'est le cas des hydroxyles des silicates, alors l'intensité des bandes d'absorption correspondantes change avec la direction de l'onde incidente c'est-à-dire avec la direction du vecteur champ électrique. On dit alors que les bandes d'absorption correspondantes sont dichroïques. Le dichroïsme constitue un élément important pour l'étude d'une structure de silicate par spectroscopie infrarouge.

D. — *Cas particulier des cristaux*

L'adaptation de la théorie des vibrations moléculaires aux vibrations dans les cristaux n'est pas toujours très facile. Les aménagements apportés successivement à la théorie des vibrations moléculaires pour représenter les vibrations dans les cristaux montrent bien les difficultés rencontrées.

Dès 1939, BHAGAVANTAM et VENKATARAYUU puis COUTURE (1947) traitèrent la maille cristalline comme une molécule géante. Cette méthode complexe conduit à prévoir plus de bandes qu'il n'en existe en réalité.

En 1946, HALFORD, par souci de simplification, suppose que les couplages entre les ions ou les molécules qui constituent la maille sont faibles. L'inconvénient de cette méthode réside bien sûr dans le fait qu'on ne sait pas à partir de quel moment un couplage peut être considéré comme négligeable.

Enfin, HORNIG en 1948, puis WINSTON et HALFORD en 1949 donnent une méthode générale d'étude des vibrations dans les cristaux où les lacunes de la précédente théorie ont été comblées par l'application de diagrammes de corrélation.

En conclusion à cette première partie, on peut dire que la théorie de la spectroscopie infrarouge est très avancée même dans le cas des cristaux, mais elle n'est malheureusement pas toujours très facile à appliquer. Plusieurs tentatives ont été faites (FARMER, 1964), la dernière en date est celle de ISHII et NAKAHIRA en 1969. Les résultats déduits de la théorie sont certes très encourageants, mais il faut bien l'avouer, restent tout de même très approximatifs. Les fréquences calculées des vibrations Si-O des silicates ne dépassent pas 1 020 cm^{-1}, or il est très courant de trouver pour ces vibrations des fréquences situées vers 1 100 cm^{-1}.

La plupart du temps, les chercheurs essaient par le biais de techniques expérimentales originales et bien adaptées de tirer le maximum de renseignements des spectres infrarouges obtenus.

II. — OBTENTION DES SPECTRES INFRAROUGES

A. — *Techniques d'étude des échantillons*

a) *Préparation.*

La préparation des échantillons de silicates est guidée, d'une part par la nécessité d'obtenir des bandes d'absorption dont les intensités soient convenables pour le domaine spectral étudié (choix de la masse et de l'épaisseur de l'échantillon) et, d'autre part, par la recherche d'un maximum d'informations ; c'est-à-dire que l'on doit tirer partie du caractère phylliteux d'un grand nombre de silicates pour étudier, s'il y a lieu, les propriétés dichroïques des bandes d'absorption par rapport à des directions de clivage préférentielles. Il existe de nombreuses techniques de préparation ; on ne citera que les plus utilisées.

α) *Pastillage.*

On broie un mélange constitué par un sel et par le solide à étudier, généralement à une concentration de 3 p. 1 000 dans le sel (du KBr si l'on étudie la région spectrale

comprise entre 400 et 4 000 cm^{-1}, du CsBr ou du CsI si on veut étendre le spectre jusqu'à 200 cm^{-1}). La poudre ainsi obtenue est pressée dans un moule jusqu'à obtention d'une pastille transparente (pression de l'ordre de 300 kg/cm^2).

La technique du pastillage peut être utilisée dans tous les cas. Il est en effet toujours possible de choisir une concentration telle que les bandes d'absorption soient comprises entre 0,2 et 1 de densité optique. Cette méthode a été très utilisée pour l'étude du réseau des silicates, car celui-ci donne des bandes d'absorption très intenses. Pourtant quelques remarques peuvent être faites à ce sujet :

1. En ce qui concerne la nature des sels utilisés, on remarque en effet entre les enregistrements obtenus avec les différents sels, des modifications du profil des bandes, voire de légers déplacements en fréquence. On verra que ces perturbations sont dues à l'effet Christiansen.

2. Il n'est pas possible d'obtenir des effets de dichroïsme sur des échantillons ainsi préparés, car l'ensemble des moments de transition est également réparti dans toutes les directions de l'espace.

3. Tous conditionnements des échantillons sont exclus (humidité, deutération...).

4. Dans le cas des argiles, des échanges entre les cations du sel et les cations compensateurs du minéral peuvent se produire. Cet inconvénient peut être évité en utilisant TlBr.

β) *Dépôt sur une fenêtre transparente à l'infrarouge.*

Ces dépôts peuvent être obtenus par évaporation d'une suspension du produit broyé dans l'eau ou l'alcool isopropylique, ou, si ce dernier n'adhère pas correctement à la fenêtre, d'une suspension du produit broyé dans un mélange de CCl_4 et de graisse fluorée.

Le dépôt sur une fenêtre du produit à étudier a les mêmes avantages que le pastillage pour ce qui est du choix des concentrations, mais il est de plus orienté.

Pour les argiles, l'axe *c* de chaque particule est ainsi sensiblement perpendiculaire au plan formé par le support ; par contre, les axes *a* et *b* prennent toutes les directions dans ce plan. De sorte que les vibrateurs attachés à chaque particule, qui ont une direction bien déterminée par rapport aux axes de cette particule, sont répartis dans des directions parallèles aux génératrices d'un cône. Dans ce cas, l'étude du dichroïsme ne peut donc permettre que la détermination de l'angle des vibrateurs avec le plan *ab*.

γ) *Préparation de films.*

La méthode des films convient bien pour les argiles. On laisse sécher lentement sur du mylar une suspension d'argile. Le film d'argile est ensuite détaché en faisant glisser le dos de la feuille de mylar sur une arête vive. Suivant le titre de la suspension, on peut avoir des films d'une épaisseur inférieure à 8 μ, ce qui est suffisant pour une grande partie du domaine spectral étudié.

δ) *Clivages.*

Cette technique est surtout utilisée pour les micas, et donne généralement des échantillons d'épaisseur convenable. Dans le cas des muscovites, il arrive pourtant que les échantillons soient si minces, que des franges d'interférence dues à des effets de réflexion sur les faces de la lame mince, apparaissent de part et d'autre de la bande

d'absorption et prennent des proportions gênantes. Un léger dépolissage suffit souvent à supprimer ces franges d'interférence.

b) *Conditionnement.*

α) *En produit adsorbé.*

Dans le cas des argiles, il est très intéressant d'étudier l'évolution du spectre d'absorption en fonction de la nature et de la quantité des produits adsorbés. Dans la mesure où l'adsorption se fait par mise en contact de l'échantillon avec la phase vapeur de l'adsorbat, le film lui-même est mis à conditionner. C'est ainsi que le conditionnement en eau des argiles peut se faire en faisant arriver dans une cellule, préalablement mise sous vide, de la vapeur d'eau dont la pression partielle est celle d'une solution d'eau et d'acide sulfurique de titre connu, préparée pour une température qui est celle du rayonnement infrarouge, soit 40°C. D'autres dispositifs ont été utilisés (PROST et CHAUSSIDON, 1969).

Pour accroître la sensibilité des mesures, il faut éviter les pertes d'énergie dues à l'absorption par la vapeur d'eau et le gaz carbonique de l'air. Il est donc nécessaire de purger l'appareil. Cependant, avec les spectrophotomètres à double faisceau, l'atténuation des faisceaux de mesure et de référence due à l'absorption par la vapeur d'eau et le gaz carbonique est la même. Toutefois lors de l'utilisation de cellules de conditionnement, afin d'éviter qu'au spectre du produit étudié ne se superpose le spectre de la vapeur d'eau, du gaz carbonique ou du solvant, une cellule identique, mais vide du produit à étudier, doit être placée dans le faisceau de référence.

On peut conserver le même protocole opératoire pour les alcools à chaîne courte, et les produits organiques susceptibles de se fixer sur les argiles qui ont une tension de vapeur suffisante.

La fixation de produits organiques sur les argiles peut aussi se faire par échange entre les cations compensateurs et des cations organiques. C'est une méthode très employée dans le cas de produits aminés.

β) *Conditionnement en température.*

Le conditionnement en température peut être intéressant pour plusieurs raisons :

1. Dans le but de suivre l'évolution des produits adsorbés en fonction de la température.

Le chauffage peut alors se faire, soit dans une étuve ou un four, soit à l'intérieur d'une cellule si le produit chauffé ne doit pas être mis en contact avec l'air ambiant. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'attendre que l'échantillon se soit refroidi pour éviter que ne se superpose au spectre d'absorption, le spectre d'émission de l'échantillon encore chaud.

2. Une diminution de température entraîne généralement une meilleure résolution du spectre, mais peut aussi produire des déplacements en fréquence de certaines bandes d'absorption. On observe ces déplacements en fréquence sur des produits liés par liaison hydrogène. C'est le cas de l'eau (PROST et CHAUSSIDON, 1969).

c) *Deutération sélective. Intercalation.*

α) Il existe une technique d'étude des échantillons particulièrement intéres-

sante : la deutération, qui trouve une application de choix dans l'étude des vibrations des groupements hydroxyles.

Du point de vue expérimental, la deutération des échantillons se fait suivant la même technique que leur conditionnement en humidité. Le fait de substituer un deutérium à un proton entraîne un déplacement de la fréquence de vibration du groupement. Une valeur approchée de la fréquence du groupement deutéré est donnée par la formule suivante :

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_D} = \sqrt{\frac{\mu_D}{\mu_H}}$$

σ en cm^{-1}

μ_D est la masse réduite du groupement deutéré,

μ_H est la masse réduite du groupement non deutéré.

En fait, ce rapport de deutération n'est pas connu avec une grande précision et varie suivant les bandes. Pour les hydroxyles, on donne généralement

$$\frac{\sigma_{OH}}{\sigma_{OD}} = 1{,}35.$$

Pourtant, la deutération joue un rôle essentiel dans l'étude des systèmes eau-argile. Ceci résulte du fait que pour des températures inférieures à 200°C, il y a deutération des hydroxyles de l'eau mais pas des hydroxyles du réseau. Cette sélectivité peut être mise à profit, soit pour étudier les hydroxyles du réseau en transposant le spectre de l'eau adsorbée dans la région des O-D, soit pour étudier le spectre de l'eau adsorbée sans être gêné par les bandes dues aux hydroxyles du réseau.

Il est aussi possible, toujours dans le cas de produits adsorbés sur les argiles, d'utiliser la deutération en vue de simplifier le spectre d'absorption. Le principe de la méthode est le suivant : une deutération très légère du produit (Waldron, 1957 ; Falk et Ford, 1966) qui se traduit par la substitution de quelques H par des D donne des groupements A-D qui vibrent sans possibilités de résonance Fermi ou de couplages mécaniques avec les groupements A-H voisins. On verra plus loin quelles sont les conséquences du phénomène de résonance Fermi. Pour ce qui est du couplage d'un vibrateur avec un vibrateur voisin il se traduit par un dédoublement de la bande d'absorption (Fripiat, 1967). Supprimer ce couplage conduit à ne faire apparaître qu'une seule bande d'absorption. Celle-ci correspond aux caractéristiques énergétiques et géométriques du vibrateur inclus dans la structure du produit adsorbé.

β) Le procédé de l'intercalation est à rapprocher de la deutération, à laquelle il est d'ailleurs fréquemment associé. Il consiste à faire adsorber à la surface des minéraux, ou dans les espaces interfeuillets, des composés susceptibles de perturber les fréquences de vibrations des hydroxyles (Little, 1966 ; White *et al.*, 1967). L'eau, l'hydrazine, l'urée, l'anion acétate provoquent de tels effets et permettent comme la deutération de particulariser les bandes d'absorption correspondantes.

d) *Étude du caractère dichroïque.*

L'étude du caractère dichroïque des bandes d'absorption se fait en lumière polarisée. Dans le cas des monocristaux, on peut faire tourner l'échantillon autour de ses axes préalablement repérés par rapport à la direction du vecteur champ $\vec{E}$ (Vedder

et McDonald, 1963 ; Fripiat *et al.*, 1965). Dans le cas des films d'argile, on doit se contenter de faire tourner l'échantillon autour d'un axe perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (Prost et Chaussidon, 1969).

e) *Spectroscopie différentielle.*

Cette technique s'applique bien à l'étude des produits adsorbés, puisqu'il suffit de placer dans le faisceau de référence un échantillon identique au support de la phase adsorbée. Les appareils dotés d'un programme d'asservissement des fentes permettent des enregistrements dans des conditions énergétiques convenables. Dans le cas des échantillons conditionnés, les remarques faites au paragraphe *b* à propos des cellules de mesure prennent évidemment toute leur importance.

B. — *Effets spéciaux*

a) *Résonance Fermi.*

La résonance Fermi est un phénomène qui se manifeste lorsque la fréquence de vibration d'une harmonique est voisine de la fréquence de vibration d'une fondamentale ou d'une autre harmonique et que les deux vibrations appartiennent au même type de symétrie. Cela se traduit par l'apparition dans le spectre de deux bandes d'intensités voisines, mais très différentes des intensités des bandes génératrices (Wilson *et al.*, 1955).

Les deutérations légères ont l'avantage, en ce qui concerne les vibrations des groupes hydroxyles, de faire disparaître la résonance Fermi.

b) *L'effet Christiansen.*

Il peut arriver que les spectres d'absorption infrarouge de poudres cristallines dispersées dans un solide ou dans un liquide présentent pour une longueur d'onde donnée un minimum d'absorption. Celui-ci peut se traduire par la déformation des bandes d'absorption, et dans les cas extrêmes, par l'apparition de bandes parasites qui ne sont pas dues à une absorption du corps étudié. Ce minimum d'absorption se produit à une longueur d'onde pour laquelle les courbes de dispersion des deux milieux se coupent. En effet quand les indices de réfraction des deux substances sont égaux, le milieu est optiquement homogène (Jeramec, 1958). Cet effet, mis à profit dans les filtres de Christiansen, se manifeste aussi dans les zones de dispersion anormale, c'est-à-dire au niveau des bandes d'absorption (fig. 1). Les courbes de dispersion se coupent alors en deux points (fig. 2). Toutefois, l'effet n'est généralement pas décelable pour les points qui se trouveraient à l'intérieur de la bande d'absorption.

Les paramètres du pic de transmission dû à l'effet Christiansen sont reliés aux variations d'indice et à la taille des particules.

1. Le profil du pic dépend de l'angle des tangentes aux courbes de dispersion (fig. 3 *a* et 3 *b*).

2. L'intensité est maximum quand le diamètre des grains est environ dix fois la longueur d'onde à laquelle se manifeste l'effet Christiansen (Jeramec, 1958).

3. La position du pic de Christiansen peut varier avec la température par suite de la modification de l'indice d'une des deux substances.

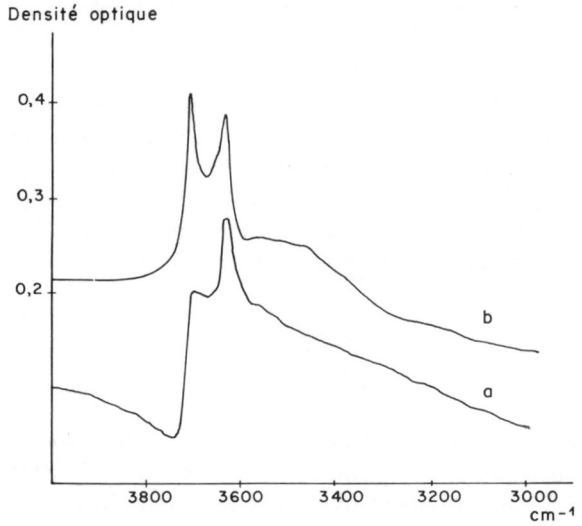


FIG. 1. — *Manifestation de l'effet Christiansen*
Spectre *a* : dépôt de métahalloysite sur une fenêtre de CaF_2
Spectre *b* : pastille de métahalloysite dans ICs

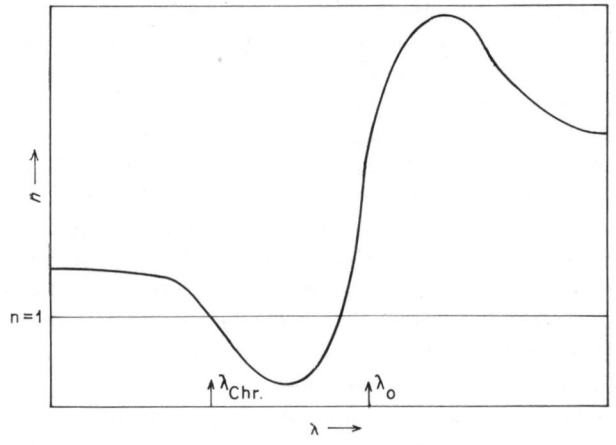


FIG. 2. — *Courbe de dispersion au voisinage d'une bande d'absorption*
Pour λ Chr., l'indice du cristal est égal à celui de l'air
(BARNES et BONNER, 1936)

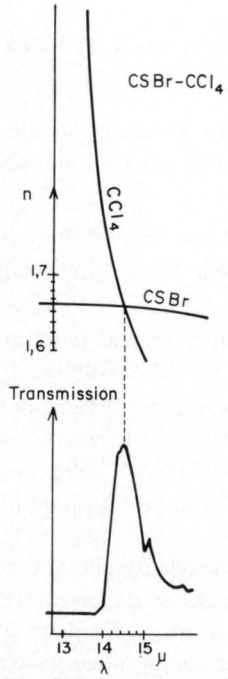


FIG. 3 *a*. — *Effet Christiansen sur le système CsBr-CCl_4 illustrant une grande différence dans les courbes de dispersion* (JERAMEC, 1958)

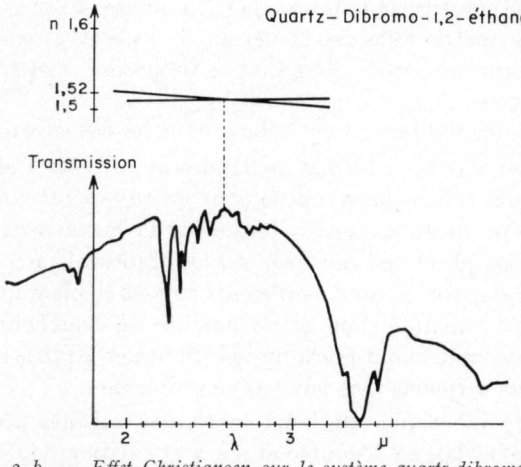


FIG. 3 *b*. — *Effet Christiansen sur le système quartz-dibromoéthane illustrant une petite différence dans les courbes de dispersion* (JERAMEC, 1958)

III. — EXPLOITATION DES SPECTRES INFRAROUGES

Expérimentalement le spectre d'absorption IR d'une substance est formé par la juxtaposition de bandes qui ne sont pas toujours résolues. On caractérise ces bandes par les paramètres suivants :

1. la position qui correspond à la fréquence de résonance du vibrateur,

2. la hauteur ou la surface de la bande qui traduit son intensité (ARNAUD, 1961 ; VINCENT-GEISSE, 1950, 1956),

3. la largeur à mi-hauteur qui dépend pour une grande part des interactions éventuelles entre les vibrateurs (VINCENT-GEISSE, 1968),

4. le profil qui selon les cas est correctement représenté par une fonction de Lorentz ou par une fonction de Gauss, ou encore par une combinaison linéaire des deux (ARNAUD, 1961 ; SESHADRI et JONES, 1963),

5. le caractère dichroïque défini par rapport à un plan ou un axe (CHARNEY, 1955).

Les techniques présentées précédemment ont essentiellement pour but d'améliorer la qualité des enregistrements et de permettre de mieux contrôler les paramètres sur lesquels il est possible d'intervenir pour apporter le maximum d'informations nécessaires. En particulier, en ce qui concerne le nombre et la position des bandes d'absorption on peut utiliser la deutération et l'orientation des échantillons.

A. — *Dénombrement des bandes d'absorption*

Le dénombrement expérimental est important car il reflète la symétrie du site où se trouve le groupe constitutif d'atomes que l'on étudie ; c'est-à-dire que le nombre de bandes décrit la symétrie telle que la verrait un « observateur » placé en ce site. Ces renseignements sont essentiels quand on se propose d'étudier la structure d'un produit libre ou adsorbé.

Le problème du dénombrement est délicat dans les cas suivants :

1. les enregistrements sont formés de bandes non résolues. Même en modifiant le conditionnement des échantillons, on ne peut guère espérer voir autre chose que des changements de profil du « massif » formé par la juxtaposition de bandes non résolues (spectre d'absorption de l'eau fixée sur les argiles). Une fois le spectre tracé, le problème de la décomposition du massif en ses bandes élémentaires se pose presque toujours, il a retenu l'attention d'un grand nombre de chercheurs et des solutions adaptées à des cas particuliers ont été trouvées (PITHA et JONES, 1966 ; CHAUSSIDON et PROST, 1968). Nous revenons plus loin sur ce problème ;

2. les vibrateurs identiques de deux molécules voisines peuvent se coupler. Dans ce cas la bande initiale se dédouble et il y a apparition de deux bandes correspondant à des mouvements en phase et en opposition de phase (FRIPIAT, 1967);

3. une bande d'absorption peut être artificiellement dédoublée par effet Christiansen. C'est le cas de la poudre de CaF_2 dispersée dans du tétrachlorure de carbone.

B. — *Fréquence de vibration*

La fréquence de vibration est caractéristique d'un groupement atomique, mais elle peut être perturbée par des modifications de l'environnement électronique. Ces faits ont bien été mis en évidence sur les hydroxyles de silicates (WHITE *et al.*, 1967 ; CHAUSSIDON, 1969). Dans le cas de systèmes où existent des liaisons hydrogène, ces déplacements en fréquence sont tout à fait classiques ; des tentatives ont été faites, soit pour les relier aux distances interatomiques, soit pour avoir une estimation de l'intensité des liaisons (HUGGINS et PIMENTEL, 1956 ; BELLAMY et OWEN, 1969 ; NAKAMOTO, 1963).

On voit ainsi comment le simple repérage des positions des bandes d'absorption peut donner des informations intéressantes.

C. — *Largeur et intensité des bandes d'absorption*

La largeur à mi-hauteur reflète, pour une grande part, les interactions des molécules. C'est ainsi que l'on explique la largeur des bandes des liquides (VINCENT-GEISSE, 1968).

La hauteur ou la surface d'une bande, qu'on désigne sous les termes d'intensité ou d'intensité intégrée, caractérisent l'absorption. Dans le cas des gaz ou des liquides, celle-ci est liée de façon simple au nombre de molécules présentes. Par contre, dans le cas des minéraux phylliteux, où l'orientation des vibrateurs n'est pas quelconque, l'absorption dépend de l'angle des vibrateurs avec le vecteur champ électrique $\vec{E}$ (FRIPIAT, 1965). Dans ce cas, l'absorption de l'échantillon s'écrit :

$$\frac{I}{I_0} = exp - ke\,\frac{\cos^2 X}{\cos r}$$

où : r est l'angle de réfraction,
X l'angle entre le vecteur champ électrique de l'onde électromagnétique et le moment de vibration,
e l'épaisseur du cristal,
k le coefficient d'absorption.

La détermination des intensités d'absorption, lorsque la normale à l'échantillon est parallèle au faisceau, ou lorsque cette dernière fait un angle de 45° avec la direction du faisceau, donne un système d'équations à partir duquel on peut éliminer plusieurs coefficients non connus tels que l'épaisseur et le coefficient d'extinction.

Ces mesures d'absorption obtenues pour deux orientations différentes de l'échantillon doivent être faites en lumière polarisée, car l'optique de l'appareil ne transmet pas la lumière de façon isotrope et joue le rôle d'analyseur. On peut donc s'attendre à une surestimation de l'absorption, sauf dans le cas où l'axe de rotation de l'échantillon fait 45° avec le plan de l'optique (CHARNEY, 1955).

D. — *Formes des bandes d'absorption*

On pose généralement comme hypothèse que les bandes sont symétriques, bien que ce ne soit pas toujours le cas (FRIPIAT, 1965).

Le choix d'une fonction pour représenter le profil d'une bande est difficile (AR-

NAUD, 1961). Il semble, lorsque les vibrateurs sont libres, que le profil de la bande soit assez bien représenté par une fonction de Lorentz. Par contre, dans le cas de vibrateurs associés, une fonction de Gauss serait mieux adaptée. Les groupements que l'on peut être amené à étudier sur les silicates phylliteux, ne sont ni totalement libres ni parfaitement associés. Une bonne représentation du profil peut être obtenue en considérant une combinaison linéaire des fonctions de Gauss et de Lorentz, dont il faut déterminer les poids respectifs (FRASER et SUZUKI, 1966).

$$F = (1 - f)\,C + fE + B \qquad (1)$$

où :

$C = \dfrac{a}{1 + \left[\dfrac{2(\nu - \nu_0)}{b}\right]^2}$ est la fonction de Lorentz

$E = a\,e - \log 2 \left[\dfrac{2(\nu - \nu_0)}{b}\right]^2$ est la fonction de Gauss

B est une fonction du premier degré représentant la ligne de base
a est la hauteur de la bande
b est la largeur à mi-hauteur
ν_0 est la fréquence du maximum
f est le pourcentage de Gauss

E. — *Décomposition d'un massif d'absorption en bandes élémentaires*

Ce problème évoqué précédemment consiste à trouver le nombre de bandes qui composent un massif d'absorption et leurs caractéristiques (largeur à mi-hauteur, profil et hauteur).

De telles décompositions, à cause du nombre important des paramètres à ajuster, ne peuvent être réalisées qu'à l'aide de calculateurs électroniques. Qu'il s'agisse d'ordinateurs ou de calculateurs analogiques (Curve Resolver Dupont), les problèmes posés concernent l'analyse numérique.

Le calcul présente deux difficultés :

1. les méthodes ne sont pas « auto démarrantes », c'est-à-dire qu'il est nécessaire pour attaquer le problème d'avoir une estimation des paramètres correspondant aux bandes les plus importantes. Ces valeurs peuvent être obtenues grâce au calculateur analogique ;

2. les méthodes sont instables, c'est-à-dire qu'une petite perturbation sur les données entraîne de grandes perturbations sur la solution. Cette instabilité se manifeste aussi bien sur l'ordinateur que sur le calculateur analogique.

Il est cependant possible d'arriver rapidement à une solution, en particulier sur des systèmes suffisamment résolus pour qu'on puisse fixer les fréquences des bandes avec précision. Un programme d'ajustement par une méthode des moindres carrés améliorée (FRAZER et SUZUKI, 1966) a donné du spectre de la kaolinite la décomposition représentée par la figure 4. D'autres tentatives ont été faites suivant la méthode développée précédemment (PROST et CHAUSSIDON, 1969).

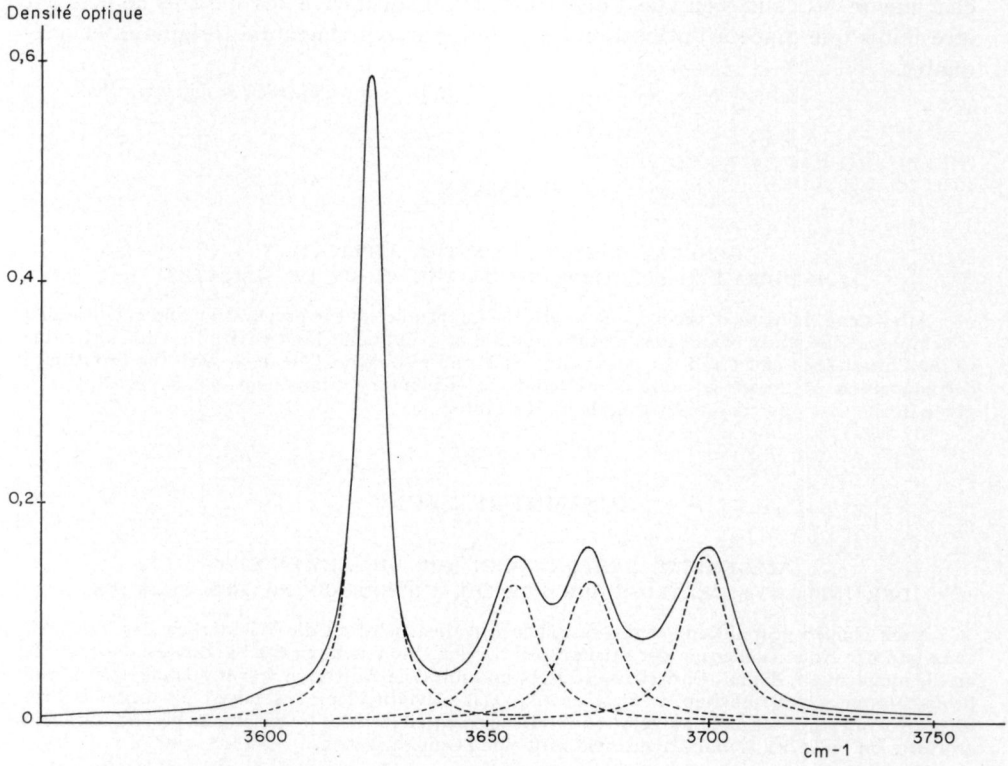


FIG. 4. — *Décomposition du spectre de la kaolinite en ses bandes composantes élémentaires*
Le coefficient f de la formule (1) qui donne le profil des bandes est dans ce cas $f = 0{,}122$. Il indique que ces bandes ont essentiellement le caractère de courbe de Lorentz.

CONCLUSION

Théoriquement, l'application de la spectroscopie infrarouge à l'étude des silicates doit permettre de résoudre un grand nombre de problèmes d'ordre structuraux ou énergétiques. En fait, deux difficultés surgissent, l'une concerne la résolution et les applications numériques des problèmes qui résultent de l'application brutale de la théorie à l'étude de la maille de silicate, l'autre, d'ordre expérimental, se rapporte à la détermination des paramètres de chacune des bandes qui constituent le spectre. Cependant, on a vu comment la notion de groupe fonctionnel, permet dans le cas de molécules ou de motifs cristallins compliqués, c'est-à-dire constitués d'un grand nombre d'atomes liés par peu ou pas d'éléments de symétrie, de laisser de côté l'étude complète des modes normaux de vibration et le calcul des fréquences correspondantes. L'étude des groupements fonctionnels des silicates, ou des produits adsorbés sur leur surface, implique bien sûr que les bandes d'absorption correspondantes soient parfaitement localisées dans le spectre. Dans ce cas, l'attribution des bandes pour des problèmes d'identification, ainsi que la détermination des paramètres de

chacune de ces bandes en vue d'une utilisation quantitative des spectres ne peuvent être faites que grâce à l'utilisation de techniques expérimentales originales et adéquates.

Reçu pour publication en décembre 1969.

SUMMARY

GENERAL COMMENTS ON THE APPLICATION
OF INFRA-RED SPECTROSCOPY IN THE STUDY OF SILICATES

After some elements of theory, one recalls the importance of the preparation and conditioning of samples in the study of silicates, and the method of avoiding at least partly the difficulties due to the Christiansen effect and the possibilities of Fermi resonance. One deals with the problem of decomposition of groups of unresolved bands in elementary component bands. A solution is given in the case of structure hydroxyls of Kaolinite.

ZUSAMMENFASSUNG

ALLGEMEINE BEMERKUNGEN AUF DIE ANWENDUNG
DER INFRAROT-SPEKTROSKOPIE FÜR DIE UNTERSUCHUNG DER SILIKATE

Nach einigen grundlegenden theoretischen Angaben, wird an die Wichtigkeit der Vorbereitung und der Konditionierung der Stichproben bei der Untersuchung der Silikate erinnert, sowie an die Möglichkeit, die mit Christiansen-Effekt und mit dem Auftreten von Resonanz nach Fermi beobachteten Schwierigkeiten, wenigstens zum Teil zu vermeiden. Anschliessend, wird das Problem der Zerlegung der nicht aufgelösten Streifengruppen il elementare zusammengesetzte Streifen erörtert. Im Falle der Kaolinithydroxyle wird eine Lösung gegeben.

РЕЗЮМЕ

Общие заметки о применении инфра-красной спектроскопии при изучении силикатов.

Р. ПРОСТ.

Обсудив некоторые элементы теории, автор напоминает о том, что при изучении силикатов приготовление и обусловленность проб имеют первенствующее значение, указывает способы хотя-бы частичного избежания трудностей возникающих при эффекте Христиансена и о возможности резонанса Ферми. Затем он рассматривает проблему расчленения не решенных групп полос на составные элементарные полосы и приводит рещение задачи на примере гидроксилов каолинита.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARTICLES

ARNAUD P., 1961. Mise au point : La mesure de l'intensité d'absorption en spectrophotométrie infrarouge. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 1037-1052.

BARNES R. B., BONNER L. G., 1936. The Christiansen filter effect in the Infrared. *Palm. physic. labor.*, Princeton University, **49**, 732-740.

BELLAMY L. J., OWEN A. J., 1969. A simple relationship between the infrared stretching frequencies and the hydrogen bond distances in crystals. *Spectrochim. Acta*, **25** A, 329-333.

BHAGAVANTAM S., VENKATARAYUDU T., 1939. *Proc. Ind. Acad. Sci.*, A9, 224.

CHARNEY E., 1955. Dichroïc ratio measurements in the infrared region. *J. Opt. Soc. Amer.*, **45**, 980-983.

CHAUSSIDON J., PROST R., 1968. Spectre infrarouge des vibrations de valence de l'eau adsorbée par la montmorillonite. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **19** (2), 25-38.

CHAUSSIDON J., 1969. Stretching lattice OH spectra of hectorite and K depleted phlogopite. *Clays and Clay minerals* (à paraître).

COUTURE L., 1947. *Ann. phys.*, **2**, 5.

FALK M., FORD T. A., 1966. Infrared spectrum and structure of liquid water. *Canad. J. Chem.*, **44**, 1699-1707.

FARMER V. C., RUSSEL J. D., 1964. The infrared spectra of layer silicates. *Spectrochimica Acta*, **20**, 1149-1173.

FRASER R. D. B., SUZUKI E., 1966. Resolution of overlapping absorption bands by least squares procedures. *Analyt. Chem.*, **38**, 1770-1773.

FRIPIAT J. J., ROUXHET P., JACOBS H., 1965. Proton delocalization in micas. *Amer. Min.*, **50**, 1937-1958.

FRIPIAT J. J., 1967. Théorie élémentaire des modes normaux de vibration dans les solides. *Bull. Gr. fr. Argiles*, **19** (2), 43-52.

HALFORD R. S., 1946. Motions of molecules in condensed systems. I. Selection rules, relative intensities, and orientation effects for Raman and Infrared spectra. *J. Chem. Phys.*, **14** (1), 8-15.

HORNIG D. F., 1948. The vibrational spectra of molecules and complex-ions in crystals. I. General theory. *J. Chem. Phys.*, **16** (11), 1063-1076.

HUGGINS C. M., PIMENTEL G. C., 1956. Systematics of the infrared spectral properties of hydrogen bonding systems : frequency shift, half width and intensity. *J. Phys. Chem.*, **60**, 1615-1619.

ISHII M., NAKAHIRA M., TAKEDA H., 1969. Far infrared absorption spectra of micas. *Proc. internation. Clay conf.*, **1**, 247-259.

JERAMEC A., 1958. *a*) Les filtres de Christiansen et leur application pour la détermination des indices de réfraction dans l'infrarouge de liquides et de solides. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 1846-1848. b). *Contribution à l'étude du filtre Christansen dans l'infrarouge*, Diplôme d'université, Paris (1958).

JUSTE C., DELAS J. 1967. Influence de l'addition d'aluminium, de fer, de calcium, de magnésium ou de cuivre sur la mobilité électrophorétique, le spectre d'absorption infrarouge et la solubilité d'un composé humique. *Ann. agron.*, **18** (4), 403-427.

PITHA J., JONES R. N., 1966. A comparison of optimization methods for fitting curves to infrared band envelopes. *Canad. J. Chem.*, **44**, 3031-3050.

PROST R., CHAUSSIDON J., 1969. The infrared spectrum of water adsorbed on hectorite. *Clay Minerals*, **8**, 143-149.

SESHADRI K. S., JONES R. N., 1963. The shapes and intensities of infrared absorption bands. A review. *Spectrochim. Acta*, **19**, 1013-1085.

VEDDER W., HORNIG D. F., 1961. Infrared spectra of crystals. *Advanc. Spectroscopy*, **2**, 189-262.

VEDDER W., MCDONALD R. S., 1963. Vibrations of the OH ions in muscovite. *J. Chem. Phys.*, **38**, 1583-1590.

VINCENT J., 1950. Exposés et mises au point bibliographiques. Intensité de raies d'absorption dans l'infrarouge. *J. Phys. Rad.*, **11**, 1-D-11 D.

VINCENT-GEISSE J., 1956. Exposés et mises au point bibliographiques. Intensité et largeur de raies ou bandes d'absorption dans l'infrarouge. *J. Phys. Rad.*, **17**, 63-71.

VINCENT-GEISSE J., 1968. Calcul du couplage des oscillateurs à l'état liquide. Mise en évidence du phénomène au moyen de la largeur des bandes d'absorption infrarouge. *Spectrochim. Acta*, **24**, A, 1-8.

WALDRON R. D., 1957. Infrared spectra of HDO in water and ionic solutions. *J. Chem. Phys.*, **26**, 809-814.

WINSTON H., HALFORD R. S., 1949. Motions of molecules in condensed systems. V. Classification of motions and selection rules for spectra according to space symmetry. *J. Chem. Phys.*, **17** (7), 607-616.

WHITE J. L., JELLI A. N., ANDRÉ J. M., FRIPIAT J. J., 1967. Perturbation of OH groups in decationated Y-zeolites by physically adsorbed gases. *Trans. Faraday Soc.*, **63**, 461-475.

OUVRAGES GÉNÉRAUX

BARCHEWITZ P., 1961. *Spectroscopie infrarouge.* Tome I. Vibrations moléculaires, 238 p., Gauthier-Villars, Paris.

BARCHEWITZ P., 1967. *Spectroscopie infrarouge.* Tome II. Fonction potentielle. Moment dipolaire. Notions de spectrochimie. 107 p., Gauthier-Villars, Paris.

BAUMAN R. P., 1962. *Absorption spectroscopy*. 611 p., Wiley, New York.

BRUGEL W., 1962. *An introduction to infrared spectroscopy*. 419 p., Methuen, London.

HERZBERG G., 1960. *Molecular spectra and molecular structure*. II. Infrared and Raman spectra of polyatomic molecules. 632 p., Van Norstrand Co. Princeton, New Jersey.

LITTLE L. H., 1966. *Infrared spectra of adsorbed species*, 427 p., Academic Press, New York.

MATHIEU J.-P., 1945. *Spectres de vibration et symétrie des molécules et des cristaux*, 496 p. Hermann, Paris.

NAKAMOTO K., 1963. *Infrared spectra of inorganic and coordination compounds*, 328 p., Wiley, New York.

PIMENTEL G. C., MCCLELLAN A L., 1960. *The hydrogen bond*, 475 p., Freeman, San Francisco.

WILSON E. B., DECIUS J. C., CROSS P. C., 1955. *Molecular vibrations. The theory of infrared and Raman vibrational spectra*, 388 p., McGraw Hill, New York.

Ann. agron., 1969, **20** (6), 565-595.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ACTION D'UN VERSOIR SUR LE SOL (1)

I. — Étude de la géométrie des versoirs classification

A. FAURE

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Ce travail comporte une étude bibliographique critique effectuée en vue de préciser les résultats acquis par les chercheurs ayant étudié le comportement d'un sol travaillé par un versoir.

Un ensemble d'examens, donnant lieu à des tests d'identification, est proposé pour définir les diverses familles de versoirs selon leurs caractéristiques géométriques ou mécaniques.

Quelques hypothèses simples sont proposées pour étudier les trajectoires, mais leur insuffisance est évidente.

La nécessité d'utiliser les théories de la mécanique d'un milieu déformable est montrée par un certain nombre d'observations dont les conclusions seront exploitées au cours de la deuxième partie.

INTRODUCTION

Longtemps délaissée au profit des recherches chimiques et biologiques, l'étude mécanique des techniques culturales est un sujet d'une actualité primordiale.

Depuis quelques années, en effet, la recherche de l'accroissement du produit par unité de travailleurs conduit l'agriculture à utiliser de plus en plus les machines. Celles-ci reproduisent en principe les actions traditionnelles, mais à des vitesses différentes. Profitant de la puissance des engins de traction, l'agriculteur, généralement, en modifie l'intensité pour obtenir plus rapidement les résultats recherchés. Les solutions classiques, mises au point à l'aide de tâtonnements successifs par des générations d'agriculteurs, ne sont donc plus valables. Il faut que la recherche reprenne une étude aussi précise que possible de l'action sur le sol des outils tractés pour permettre de les rendre plus aptes à remplir les nouvelles fonctions qui leur sont demandées. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes proposé d'effectuer une analyse

(1) Extraits d'une Thèse de 3e Cycle soutenue le 18 décembre 1968 à la Faculté des Sciences de Grenoble

critique des diverses attitudes adoptées jusqu'à présent en vue d'établir une base de références aux recherches fondamentales rendues ainsi nécessaires.

Les objectifs du labour ont été clairement définis par de nombreux auteurs tels JEAN-BRUHNES (1910), DEMOLON (1946), HAUDRICOURT et JEAN-BRUHNES-DELAMARRE (1955), BAVER (1956), HÉNIN *et al.* (1960), DALLEINNE (1962), KUIPERS (1963) et SOHNE (1966), et peuvent se résumer en quatre points :

— destruction des mauvaises herbes,
— enfouissement des matières organiques,
— donner au sol un état favorable à la germination des semences et au développement des racines,
— assurer le contrôle de l'eau.

Les outils n'ont cessé de s'améliorer plus ou moins empiriquement au cours des âges et cette évolution a conduit à la création d'une pièce dont le rôle est fondamental : le versoir.

Ce premier article se propose donc de mieux faire connaître cette pièce, d'en faire ressortir les principales caractéristiques et le mode d'action.

Une étude de la forme géométrique des versoirs permettra de proposer une série d'examens descriptifs donnant lieu à un ensemble de tests d'identification. Une description des diverses actions du versoir entraînera un choix nécessaire de grandeurs caractéristiques intrinsèques.

Un prochain article permettra d'aborder l'étude du mouvement de la bande de terre sur le versoir et de mettre en évidence les principales hypothèses formulées pour l'interprétation théorique du comportement du sol.

Ainsi cette étude critique permet de faire une mise au point des divers travaux effectués jusqu'à présent par un certain nombre d'auteurs. Elle doit être également la base de départ d'une étude plus approfondie sur les déformations du matériau et leur interprétation théorique au moyen des critères d'écoulement des milieux déformables.

Deux auteurs ont remarquablement contribué à mieux connaître les versoirs. Le premier, WHITE (1918), fait un historique de l'évolution mathématique des surfaces proposées au XIXe siècle. Le second, DALLEINNE (1962), établit une classification précieuse des versoirs existant actuellement et développe une méthode simple et rapide d'identification qui permet de se faire une idée approchée des actions cinématiques et mécaniques que subit le sol au cours du labour.

I. — ÉTUDE DE WHITE

UTILISATION DE LA GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE

Après avoir exposé une méthode pour établir l'équation d'un versoir dont la surface est un hyperboloïde à une nappe, WHITE (1918) rappelle de façon intéressante la nature géométrique et l'équation de quelques versoirs « historiques ».

Le trièdre de références proposé par WHITE, et qui sera adopté par la suite, est direct. Les axes de coordonnées sont tels que le sens d'avancement du versoir est l'axe Oz', opposé à Oz, et que la terre est versée dans la direction Ox.

1. En 1760, un Écossais, James SMALL, construisit un conoïde (fig. 1) engendré par une droite (D) parallèle à un plan fixe (xOy) s'appuyant sur une droite fixe (mp) et sur une demi-chaînette (hO) située dans un plan passant par Oy.

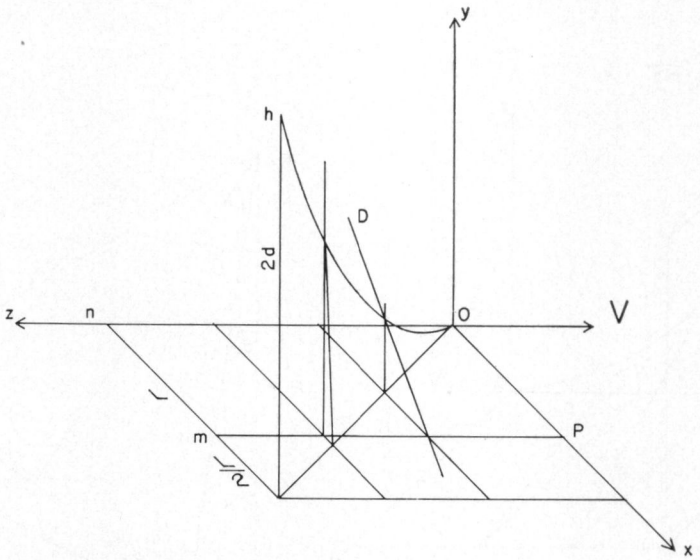


FIG. 1. — *Versoir de Small : Éléments directeurs*

2. A la même époque que SMALL, un autre Écossais, STEPHENS, choisit aussi un conoïde (fig. 2). Cette surface est engendrée par une droite (D) restant parallèle à un plan fixe (xy) et s'appuyant, d'une part sur une directrice rectiligne (mp) perpendiculaire au plan (xy) et d'autre part sur une directrice courbe (Γ) tracée sur un cylindre (C) de rayon L dont la transformée par développement plan du cylindre (C) est un arc de cercle de rayon $2\pi L$.

3. En 1788, Thomas JEFFERSON se base sur le fait que le rôle du versoir est de recevoir le sol venant du soc et de le retourner avec le moins de résistance possible. Il construisit une surface qu'il considéra, sans démonstration, comme répondant à ces données (fig. 3).

Le mode de génération de cette surface fait clairement apparaître qu'il s'agit d'un paraboloïde hyperbolique.

4. En 1832, un Italien LAMBRUSCHINI propose comme surface de versoir un hélicoïde (fig. 4) qu'il considère comme étant « plus efficace » que le versoir de JEFFERSON. L'axe de l'hélicoïde est parallèle à la direction d'avancement et le rayon du cylindre directeur est égal à la largeur de la bande de terre labourée. La rotation de la droite génératrice est proportionnelle à son déplacement dans la direction Oz.

5. En 1846, un Anglais, le Rév. W. L. RAHM, s'appuya sur le principe que les lignes du versoir, dans la direction d'avancement pouvaient être des droites, mais que les sections dans les plans perpendiculaires à cette direction pouvaient être rectilignes ou courbes, selon les caractéristiques du sol à travailler. Il s'accorda à dire que pour les sols meubles cette surface pouvait être voisine d'un paraboloïde hyper-

bolique du même type que celui de JEFFERSON. Mais pour des sols argileux lourds, la surface est telle que ces lignes sont concaves, et pour des sols sableux légers, ces lignes sont convexes. WHITE constate que W. L. RAHM n'a pas donné de description exacte sur la forme de ces courbes et qu'il n'est pas possible de déterminer l'équation

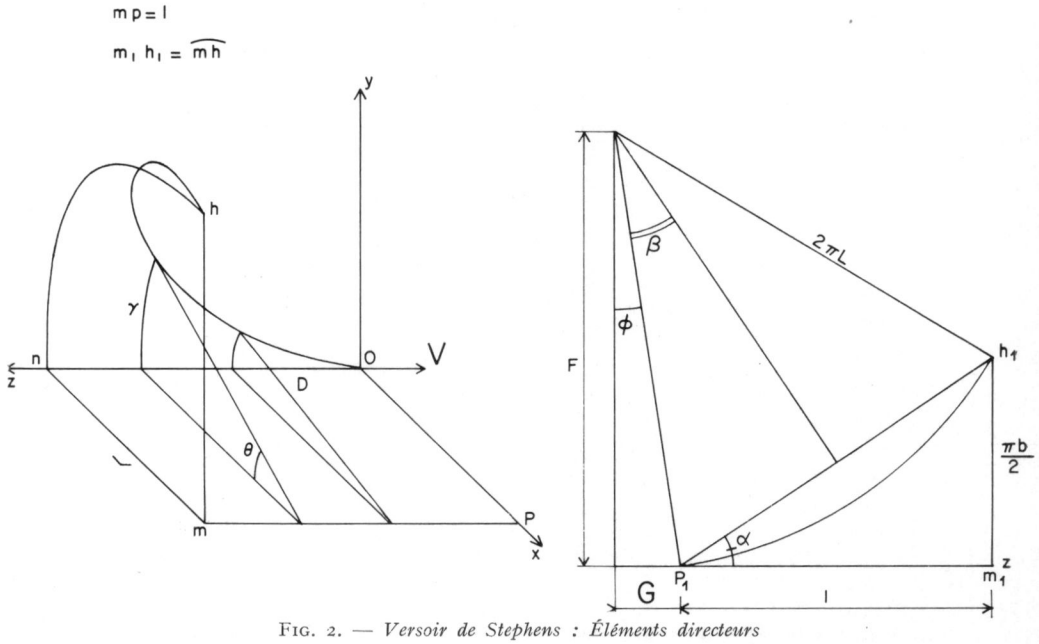


FIG. 2. — *Versoir de Stephens : Éléments directeurs*

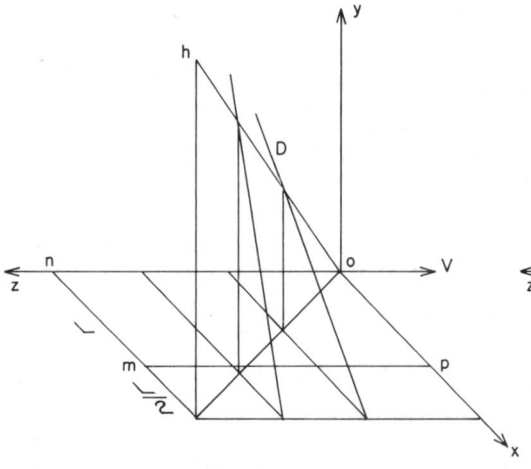


FIG. 3. — *Éléments directeurs du versoir de Jefferson*

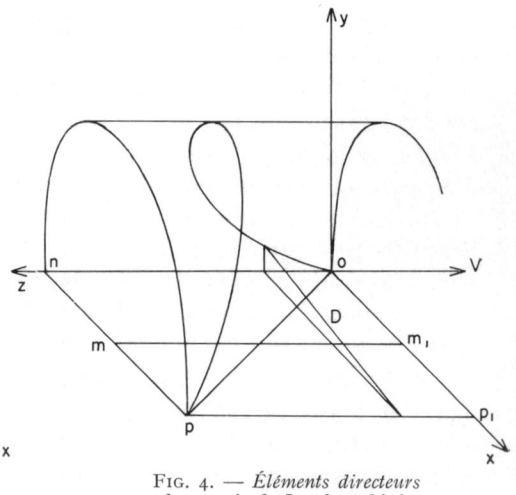


FIG. 4. — *Éléments directeurs du versoir de Lambruschini*

de ces surfaces. Cependant comme ces surfaces contiennent une famille de droites parallèles à une direction de plans et qu'elles ne sont pas du deuxième ordre, WHITE conclut qu'elles sont au moins d'ordre 4.

6. En 1852, l'Américain KNOX prit un brevet pour une surface de versoir certainement unique. Le squelette de cette surface (fig. 5) (éléments directeurs) comporte

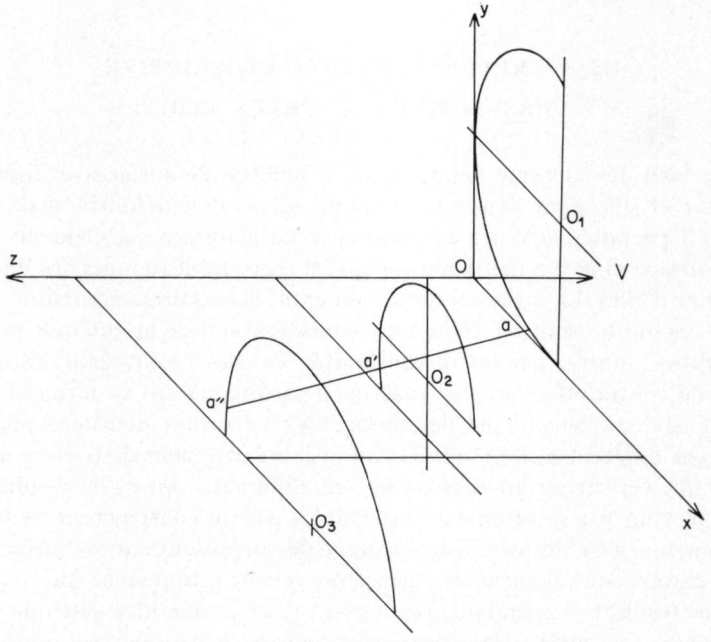


FIG. 5. — *Versoir de Knox : Éléments directeurs*

trois arcs de cercles situés dans des plans parallèles et équidistants, tels qu'une famille de droites les rencontre tous les trois. Les deux cercles extrêmes sont de diamètres égaux et le cercle intermédiaire a un diamètre deux fois plus petit. L'équation de cette surface est du huitième degré.

7. En 1854, un Américain Joshua GIBBS prit un brevet pour un versoir cylindrique à base circulaire, alors qu'en Allemagne étaient construits à peu près à la même époque des versoirs cylindriques à base hyperbolique.

8. En 1863, un autre Américain MEAD construisit un versoir en tronc de cône de révolution.

9. En 1867, selon WHITE, le *Report of the New York State Agricultural Society* publie un rapport complet sur les essais de charrues effectués par HOLBROOK, à Boston (Mass.). Il met en évidence la supériorité de ces modèles sur les autres versoirs. Les surfaces choisies par HOLBROOK pour ses versoirs sont des plages d'hyperboloïdes à une nappe.

10. D'autres types de versoirs sont mentionnés pour mémoire, par WHITE. En effet, un grand nombre de surfaces a été utilisé pour la construction des versoirs mais leur complexité mathématique est telle que leurs équations n'ont pu être établies. Par exemple, DAVIS, en 1818, considère une surface engendrée par un arc de cercle

s'appuyant sur deux autres arcs de cercles. JACOB en 1834, propose un versoir dont la surface est une combinaison de deux surfaces mathématiquement compliquées, chacune d'elles ayant deux familles de génératrices rectilignes. WITHEROW en 1839 et PIERCE construisent un versoir dont la surface est engendrée par une ingénieuse utilisation d'un arc de cycloïde.

II. — REPRÉSENTATION DESCRIPTIVE ET PERSPECTIVES. COURBES LIMITES

Il reste bien évident que depuis 1918 le nombre de surfaces utilisées n'a fait qu'augmenter et que cette étude n'est qu'un bilan, non définitif, mais fort utile. WHITE définit parfaitement bien la position et l'orientation des éléments directeurs de chaque surface mais n'a pas voulu, ce qui est regrettable, donner des limites explicites à chacune d'elles. La surface d'un versoir étant nécessairement définie, les raisons du choix de ces limites sont relatives à des considérations de mécanique du matériau.

Ces courbes limites, par les discontinuités qu'elles créent dans les champs de vitesses ou de contraintes, ont des conséquences directes sur la forme des labours. Par exemple, si deux versoirs ont des surfaces géométriques identiques mais limitées de deux façons différentes, le retournement et le rabattement de la terre ainsi que le dégagement du versoir seront nécessairement différents. Ainsi, les résultats donnés par WHITE ne sont pas directement exploitables par un constructeur tenté par telle ou telle forme du siècle dernier. Il lui manque des précisions sur les surfaces d'intersection qui définissent l'élément de surface du versoir proprement dit.

Tous ces résultats, cependant, permettent d'avoir une idée générale de l'allure que peut prendre une surface de versoir et les figures 6 à 10 apportent un complément

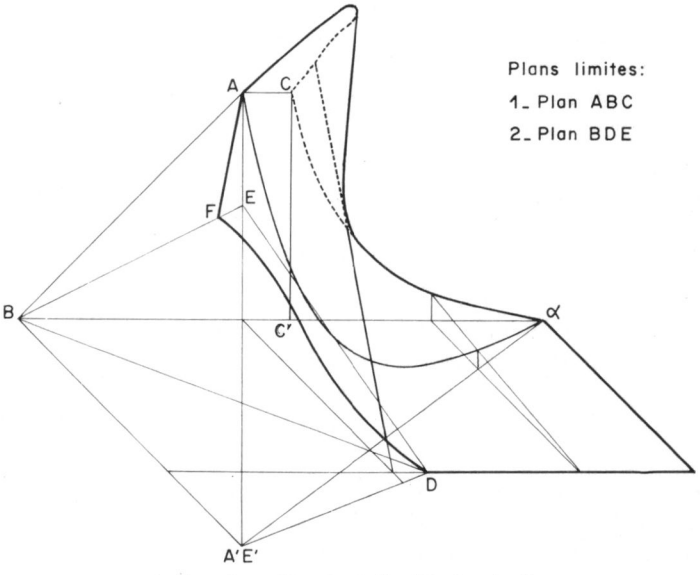


FIG. 6. — *Versoir de Small : Perspective*

d'information en donnant un aperçu de la forme géométrique de certains d'entre eux. Pour faciliter la compréhension des figures, les surfaces qui ne sont jamais en contact avec le matériau ont été grisées.

Afin de rester en accord avec la remarque précédente, ces surfaces ont été limitées de façon absolument arbitraire par des plans spécifiés sur chaque épure. Aucune conséquence cinématique ou agronomique n'en a été tirée car une telle étude dépasse le cadre de ce chapitre.

Une remarque mérite d'être faite sur le versoir de KNOX dont WHITE donne le mode de génération et l'équation. Pour construire, par les méthodes de la géométrie

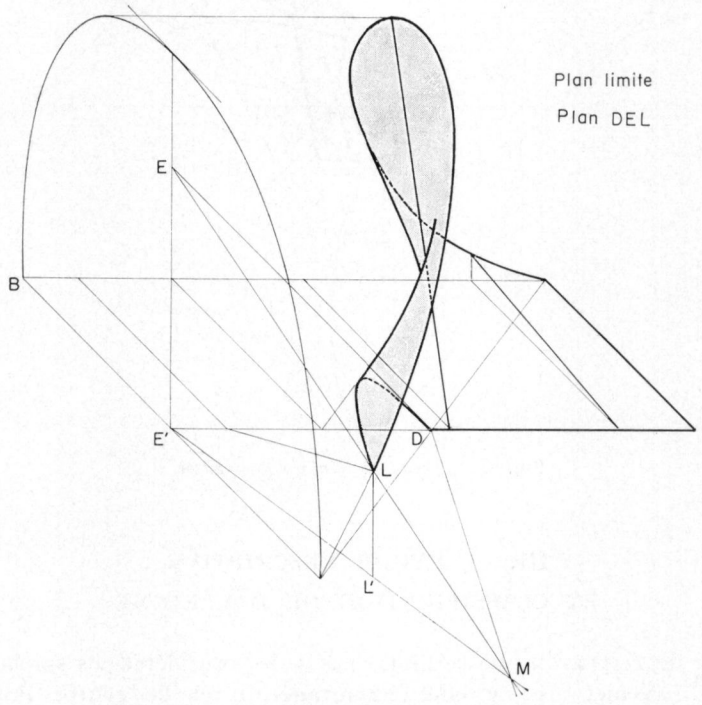


FIG. 7. — *Versoir de Lambruschini : Perspective*

de Monge (fig. 11), les génératrices de la surface de KNOX (fig. 8), il a fallu utiliser des cônes auxiliaires ayant pour base commune le cercle de centre O_1 et dont les sommets sont sur le cercle de centre O_3. Les intersections de chacun de ces cônes avec le plan contenant le cercle de centre O_2 sont des cercles de centre (ω) et de même rayon que celui-ci. Les génératrices communes à chacun de ces cônes auxiliaires et à la surface de KNOX sont donc définies par les intersections des cercles (ω) avec le cercle (O_2). Il y a deux familles de génératrices et la surface de KNOX est composée de deux nappes. Pour construire le versoir proprement dit une seule plage d'une des deux nappes a été considérée, celle définie par les génératrices du type *a*.

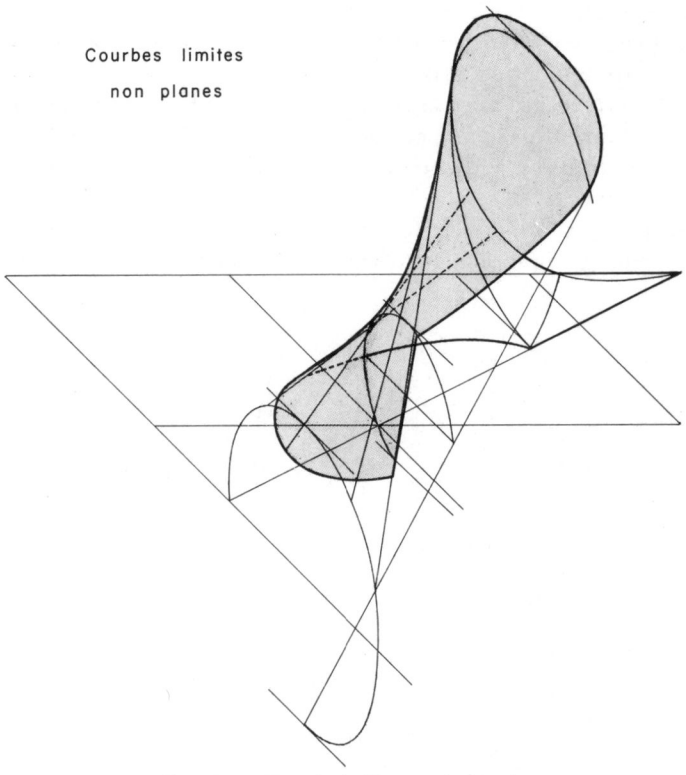


FIG. 8. — *Versoir de Knox : Perspective*

III. — ÉTUDE DESCRIPTIVE ET CLASSIFICATION DE DALLEINNE

L'étude de DALLEINNE ne se limite pas à des considérations sur la géométrie des surfaces. Elle met aussi en relief l'importance du rôle des courbes limites et fait faire ainsi un pas en avant considérable à la connaissance descriptive et expérimentale de l'action d'un versoir sur le sol (c'est-à-dire à la connaissance de l'outil par l'utilisateur).

Dans un certain nombre d'articles intéressants sur la façon de déterminer *de visu* un versoir, DALLEINNE a été amené à en définir trois grandes catégories. Il définit également « les angles de vision », variables selon les catégories, sous lesquels il faut effectuer les observations pour classer le versoir considéré.

Rappelons brièvement ces trois classes et les « angles de vision » proposés pour chacune d'elles par DALLEINNE.

1. *Versoirs cylindriques*

La directrice de ces versoirs est en général une parabole, ou une courbe d'allure parabolique.

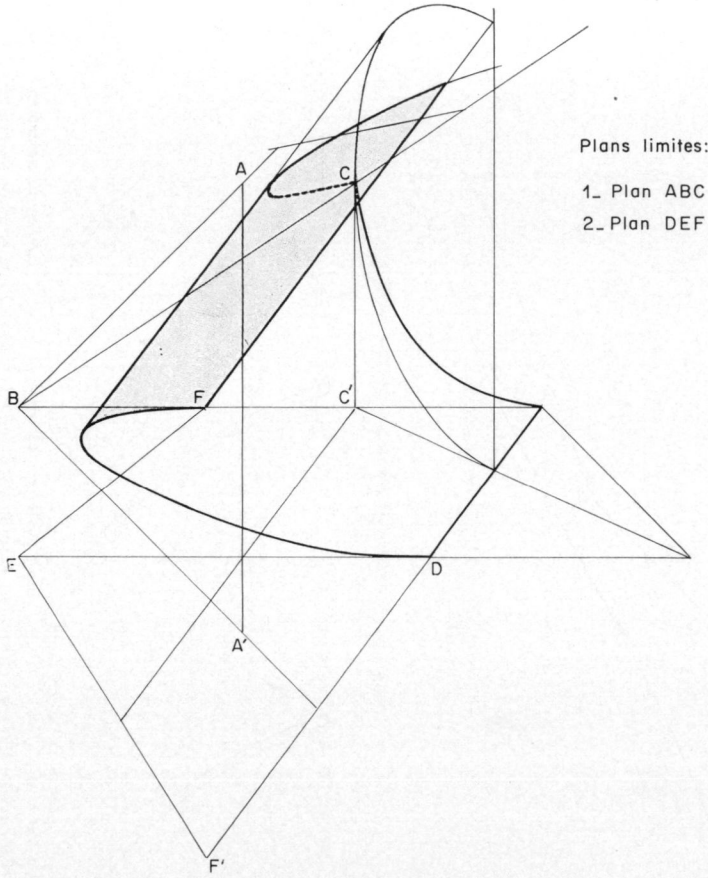


FIG. 9. — *Versoir de Gibbs : Perspective.*

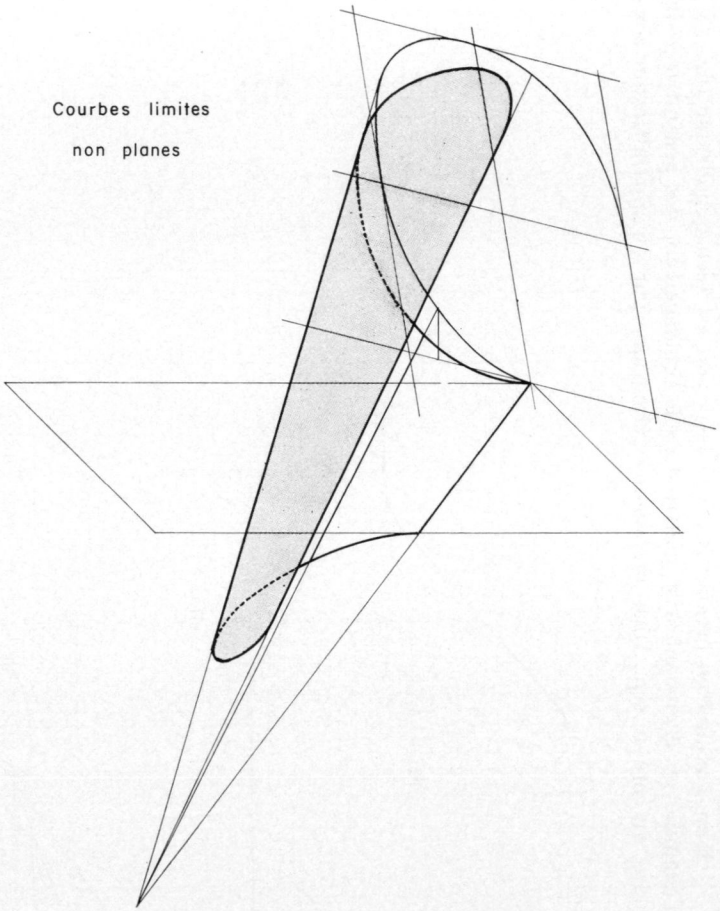


FIG. 10. — *Versoir de Mead : Perspective.*

— Pour s'assurer en premier lieu que le versoir est bien cylindrique (fig. 12), on l'examine en cherchant à se mettre dans le prolongement des génératrices du cylindre, du côté du sep. Ainsi un versoir « cylindrique pur » n'apparaîtra que sous

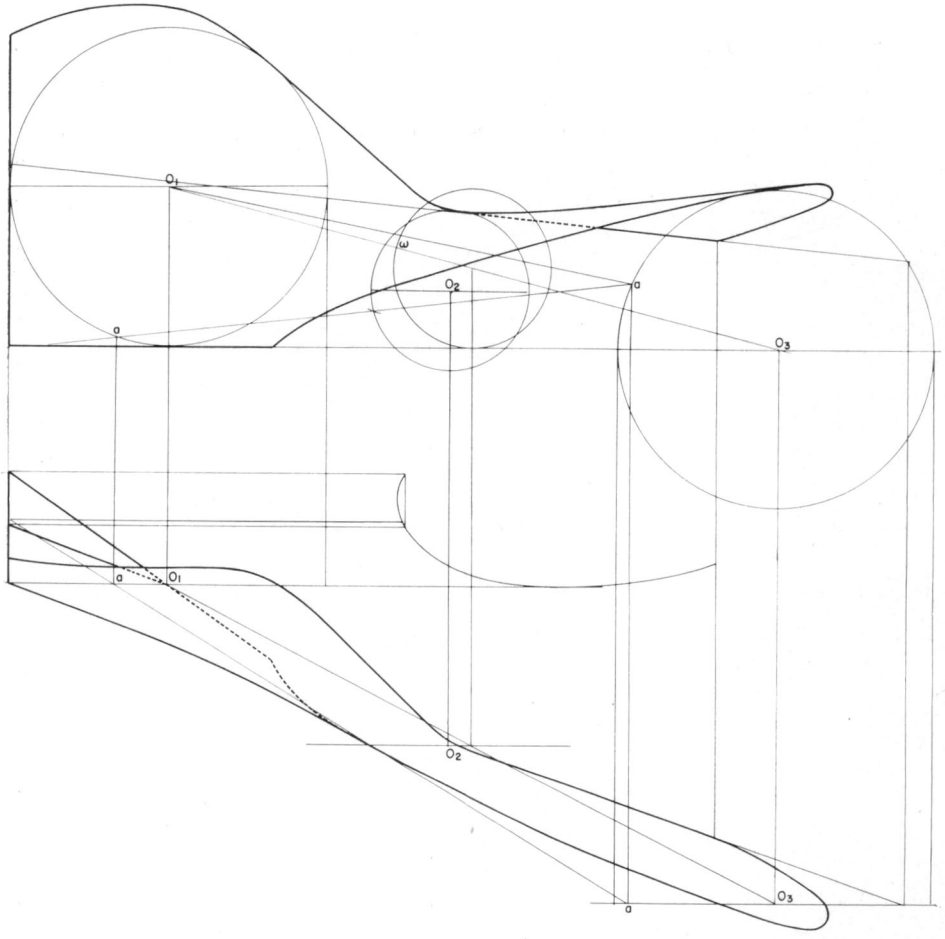


FIG. 11. — *Versoir de Knox : Géométrie de Monge.*

FIG. 12. — *Versoir cylindrique.* Classification de DALLEINNE (Premier angle de vision).

la forme d'un arc de courbe : sa propre directrice. Certains versoirs présentent par rapport au cylindre pur une déformation très légère, soit près du bord supérieur, soit vers la « queue » du cylindre : ils sont appelés « cylindres légèrement déformés ».

— Le deuxième angle de vision (fig. 13) permet alors de préciser l'inclinaison du cylindre par rapport au soc et au plan horizontal. On examine le versoir horizon-

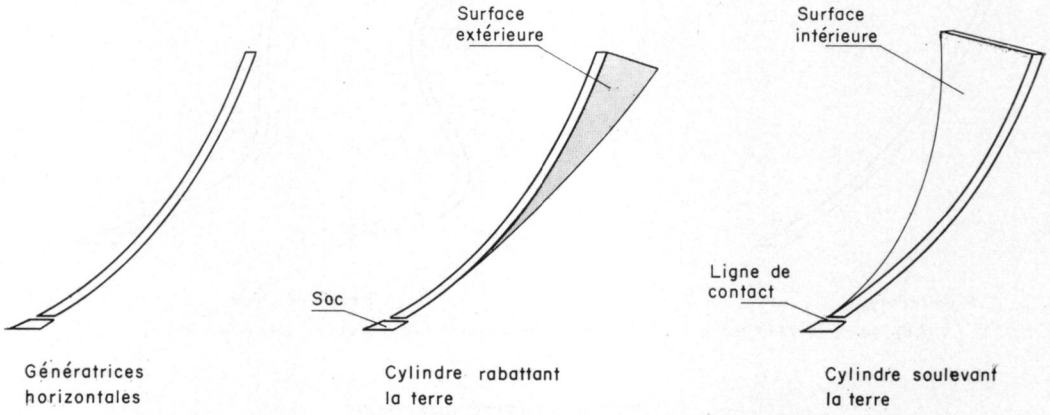


FIG. 13. — *Versoir cylindrique.* Classification de DALLEINNE (Deuxième angle de vision).

talement en se mettant dans le prolongement de la ligne de contact du soc et du versoir. Si cette ligne de contact n'est pas horizontale, on se place du côté du sep, dans le prolongement du bord d'attaque du soc.

— Un versoir aura tendance à rabattre * la terre si ses génératrices sont inclinées vers l'arrière : seule est alors visible sa surface extérieure.

— Un versoir aura tendance à soulever* la terre si ses génératrices sont inclinées vers l'avant : seule est alors visible sa surface intérieure.

2. *Versoirs universels*

En utilisant les mêmes axes d'observation que précédemment :

— on cherche à évaluer la fraction de surface de ce versoir qui peut être assimilée à une surface cylindrique, ce qui permet en outre d'estimer la façon dont les plages non cylindriques sont « déformées ». Un versoir universel apparaît comme un versoir cylindrique déformé soit seulement vers l'arrière, soit déformé dans sa partie inférieure vers l'arrière et dans sa partie supérieure vers l'avant ;

— on observe dans un deuxième temps (fig. 14) le versoir dans le prolongement de la ligne de contact soc-versoir en se plaçant face à la muraille de labour. Dans cette direction le versoir universel peut apparaître de deux types différents :

Premier type : seule apparaît une fraction de sa surface intérieure : le versoir a tendance à laisser glisser * la terre sur le côté ;

Deuxième type : une fraction de sa surface intérieure et une fraction plus ou

* L'astérisque qui suit certains mots du texte renvoie au Glossaire.

moins importante de sa surface extérieure apparaissent simultanément : le versoir tend alors à briser ou à retourner * la terre.

Dans cette catégorie, entre aussi le versoir dit « américain », qui est un versoir universel « court », au bord supérieur arrondi.

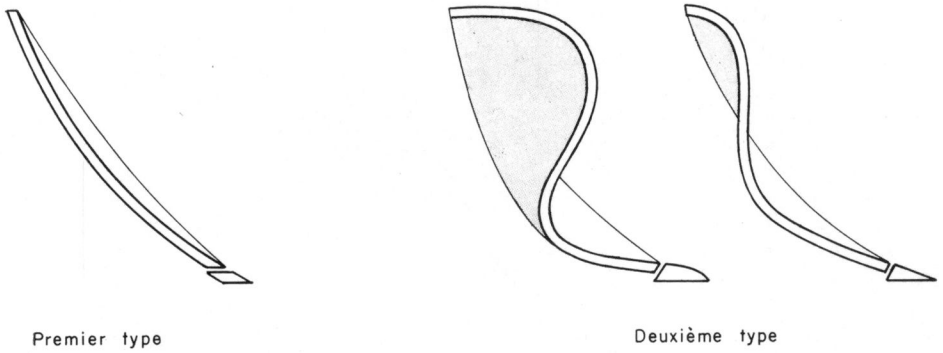


FIG. 14. — *Versoir universel.* Classification de DALLEINNE (Deuxième angle de vision).

3. *Versoirs à tendance hélicoïdale*

Deux angles de vision sont nécessaires pour en estimer la forme.

— Vue de dessus, la surface d'un versoir appelé « vrai hélicoïdal » semble « au point de torsion se réduire à un point ». Un versoir appelé « faux hélicoïdal » est une surface qui « ne semble pas se réduire à un point, mais présente une zone de torsion plus ou moins large » (fig. 15). Cette vue de dessus permet d'apprécier si l'hélicoïde est à axe droit ou à axe incurvé vers l'intérieur ou vers l'extérieur (fig. 16).

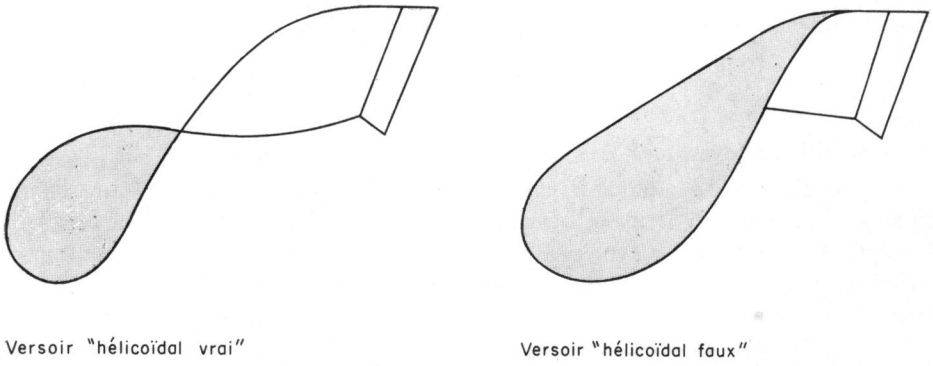


FIG. 15. — *Versoir à tendance hélicoïdale.* Classification de DALLEINNE (Premier angle de vision).

— En se plaçant en arrière du versoir, dans la direction de « l'axe de la surface hélicoïdale » on peut préciser la position de « l'hélice » par rapport au plan du soc, donc par rapport au plan horizontal. La position de l'hélice est définie par la direction de son axe qui peut être plus ou moins incliné que le plan du soc par rapport au plan horizontal (fig. 17).

Si le versoir est à axe incurvé, il y a un grand nombre de directions d'axes correspondant chacune à une plage de la surface du versoir. L'ensemble de ces directions permet à l'observateur de préciser si l'axe incurvé a sa concavité tournée vers l'extérieur ou vers l'intérieur et s'il a tendance à s'élever ou s'abaisser.

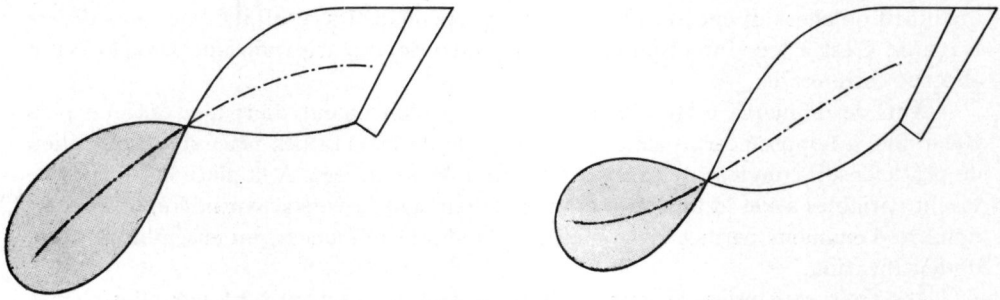


FIG. 16. — *Versoir à tendance hélicoïdale.* Classification de DALLEINNE (Premier angle de vision). Observations sur la courbure de l'axe.

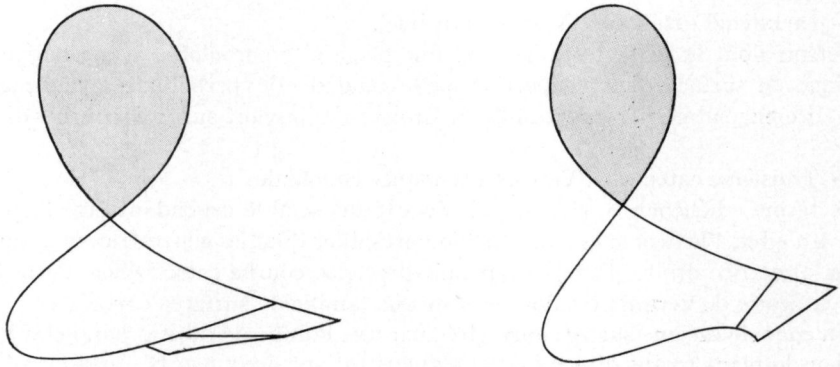


FIG. 17. — *Versoir à tendance hélicoïdale.* Classification de DALLEINNE (Deuxième angle de vision). Inclinaison de l'axe.

IV. — GÉNÉRALISATION DE LA MÉTHODE DE DALLEINNE MÉTHODE DES TESTS

Cette remarquable étude de DALLEINNE représente une étape intéressante dans la compréhension du rôle joué par le versoir dans une opération de labour. La classification proposée met bien en évidence trois types de géométrie pour les surfaces utilisées. Elle ne présente pas uniquement un caractère esthétique car les actions

mécaniques de ces trois familles de surfaces sur un même sol sont caractérisées par des résultats différents tant par la formation des mottes, l'allure de la bande retournée et l'émiettement, que par des puissances de traction mises en jeu. Ces caractéristiques ne semblent pas avoir été l'objet d'études quantitatives aux laboratoires. Les constructeurs et les utilisateurs de charrues ont tous profondément conscience de l'aspect qualitatif qu'elles ont encore. Ils en utilisent cependant les résultats dans leurs divers travaux. C'est à leur intention et dans un souci de vulgarisation que DALLEINNE a effectué cette étude.

Afin de donner à cette classification un prolongement dans une optique plus théorique, à l'opposé certainement de la pensée de DALLEINNE placé dans un milieu de praticiens, il convient de préciser la terminologie utilisée. A la place des angles de vision variables selon la famille à laquelle appartient le versoir considéré, un certain nombre d'examens permet de définir, à l'aide de références, un ensemble de tests d'identification.

Les trois catégories de versoirs définies par DALLEINNE sont par elles-mêmes caractéristiques, mais une définition strictement géométrique de chacune d'elles s'impose.

— Première catégorie : Versoir cylindrique.

Versoir dont la surface est une plage de cylindre, la directrice de ce cylindre pouvant être une courbe quelconque, mais de façon générale, cette courbe a une allure parabolique.

— Deuxième catégorie : Versoir universel.

Versoir dont la surface semble être une plage d'hyperboloïde à une nappe, ou une plage de surface dont l'aspect rappelle celui de l'hyperboloïde à une nappe, c'est-à-dire engendrée par une famille de droites s'appuyant sur trois courbes directrices.

— Troisième catégorie : Versoir à tendance conoïdale.

Le terme « hélicoïde », s'il est plus évocateur, semble cependant être trop restrictif. En effet, l'hélicoïde est un conoïde particulier dont les génératrices s'appuient sur une directrice droite (l'axe) et sur une directrice courbe : une hélice. Cette troisième catégorie de versoirs est donc en fait une famille de surfaces conoïdales.

Un conoïde est une surface engendrée par une famille de droites parallèles à une direction de plans (plans directeurs) et s'appuyant sur deux courbes appelées directrices. Il est donc possible d'élargir cette définition et de parler de surface conoïdale à génératrices courbes ou plus simplement surface à tendance conoïdale en considérant une famille de courbes s'appuyant sur deux courbes directrices et soumises à une condition géométrique supplémentaire.

Ces définitions étant établies, de quelles façons est-il possible de classer un versoir donné ?

1. *Tests d'ordre géométrique*

Test A : Test du contour (1) *apparent « à surface minimale ».*

On essaie de placer le versoir de telle façon que son contour apparent soit une courbe unique, ou en cas d'impossibilité, définisse une surface dont l'aire soit la plus petite possible :

(1) Le « contour d'un versoir » est le contour apparent particulier dans la direction donnant à la surface projetée sa valeur maximale.

— ce contour apparent est un arc de courbe (arc de la courbe directrice) présentant éventuellement de très petites plages de la surface : le versoir est cylindrique (Première catégorie) ;

— ce contour apparent est une surface dont la plus petite dimension est très réduite donnant l'impression qu'il s'agit d'un cylindre déformé : le versoir est universel (Deuxième catégorie) ;

— ce contour apparent est une surface très importante ne pouvant jamais être réduite comme précédemment : le versoir est à tendance conoïdale (Troisième catégorie).

Test B : Test de la ligne cachée.

Ce test n'est applicable qu'aux versoirs de la troisième catégorie. Sous un certain nombre de directions appropriées aisément déterminées, ces versoirs ont un contour apparent présentant un point double.

S'il existe au moins trois axes de projection parallèles à une même direction de plans (P) tels que le contour apparent de la surface selon ces axes ne présente aucune ligne cachée, et qu'en outre la concavité de la surface soit différente de part et d'autre du point double apparent, le versoir est une plage de conoïde à génératrices rectilignes. La direction de plans mise en évidence est celle du plan directeur.

S'il n'existe pas de tels axes de projection, le versoir est une plage de surface conoïdale à génératrices courbes.

S'il existe au maximum deux axes non parallèles entre eux et non parallèles au plan directeur (s'il existe) tels que le contour apparent selon ces axes présente un point double et ne présente aucune ligne cachée, ces axes sont les directrices de l'une ou l'autre des surfaces définies précédemment.

2. *Tests d'ordre cinématique*

Test C : Test de la ligne moyenne *.

Ce test n'est applicable qu'aux surfaces conoïdales à génératrices rectilignes.

La ligne moyenne du versoir considéré peut être rectiligne, concave ou convexe. Précisons qu'une ligne est dite concave si elle tourne sa concavité dans la direction Ox, c'est-à-dire du côté de la terre précédemment labourée. Il est d'ailleurs intéressant de signaler qu'un versoir à ligne moyenne concave donne un déport * plus grand qu'un versoir à ligne moyenne convexe.

Test D : Test du contour apparent dans la direction de la ligne de contact soc-versoir vers l'octant négatif.

Cas d'un versoir cylindrique :
ce contour apparent est :

— un arc de la courbe directrice. Les génératrices sont horizontales, alors le versoir laisse glisser * et retourne * la bande de terre. Celle-ci se trouve pratiquement dans un cas de déformation plane dans xOy ;

— la projection de la surface intérieure. Tout en retournant la bande labourée le versoir a tendance à l'abaisser * ;

— la projection de la surface extérieure. Tout en retournant la bande labourée, le versoir a tendance à la soulever *.

Cas d'un versoir universel :

pour cette catégorie de versoirs, ce test correspond exactement au deuxième angle de vision de DALLEINNE et les mêmes conclusions s'en déduisent.

Cas d'un versoir à tendance conoïdale :

ce test n'est pas applicable à cette catégorie pour laquelle les tests E et F sont plus appropriés.

Test E : Test du contour apparent dans la direction horizontale parallèle au plan directeur.

Ce test ne peut s'appliquer strictement qu'aux surfaces conoïdales à génératrices rectilignes.

— Si ce contour apparent ne présente aucune ligne cachée, le versoir laisse glisser et retourne la terre.

— Si, pour supprimer les lignes cachées, l'observateur doit changer de projection et, tout en restant parallèle au plan directeur, doit « regarder » le versoir vers le bas (il ne voit alors du soc que la surface supérieure), le versoir retourne la terre et a tendance à la soulever.

— Si, pour atteindre le même but, l'observateur doit « regarder » vers le haut (il voit alors du soc une partie de la surface inférieure en plus de la surface supérieure), le versoir retourne la terre et a tendance à l'abaisser.

Test F : Extrapolation du test E.

Il est possible d'appliquer le test E, avec moins de rigueur, aux surfaces à tendance conoïdale, par la détermination approximative de l'enveloppe des génératrices courbes tendant à réduire au maximum les lignes cachées des différents contours apparents considérés. Selon la concavité de cette enveloppe, les différentes conclusions mises en évidence par le test C peuvent être étendues à ces surfaces. Selon la tendance de cette enveloppe à s'élever ou à s'abaisser, les différentes conclusions du test E peuvent être également considérées pour ces surfaces.

L'ensemble de cette méthode est résumé dans l'organigramme de la figure 18.

Cette méthode des tests permet sans doute une classification plus exacte mais elle présente l'inconvénient majeur d'être très longue. La classification proposée par DALLEINNE, par contre, bien que parfois inexacte sous l'aspect mathématique, présente d'incontestables intérêts dans la pratique qui, avant tout, préoccupe son auteur.

V. — APPLICATION DE LA MÉTHODE DES TESTS

Afin d'établir un lien entre l'étude de WHITE et la méthode de DALLEINNE, nous avons appliqué aux versoirs présentés par WHITE la série de tests nécessaires pour retrouver leurs caractéristiques géométriques et se faire une idée de leur action mécanique. Seuls sont étudiés les versoirs dont nous connaissons déjà la représentation perspective.

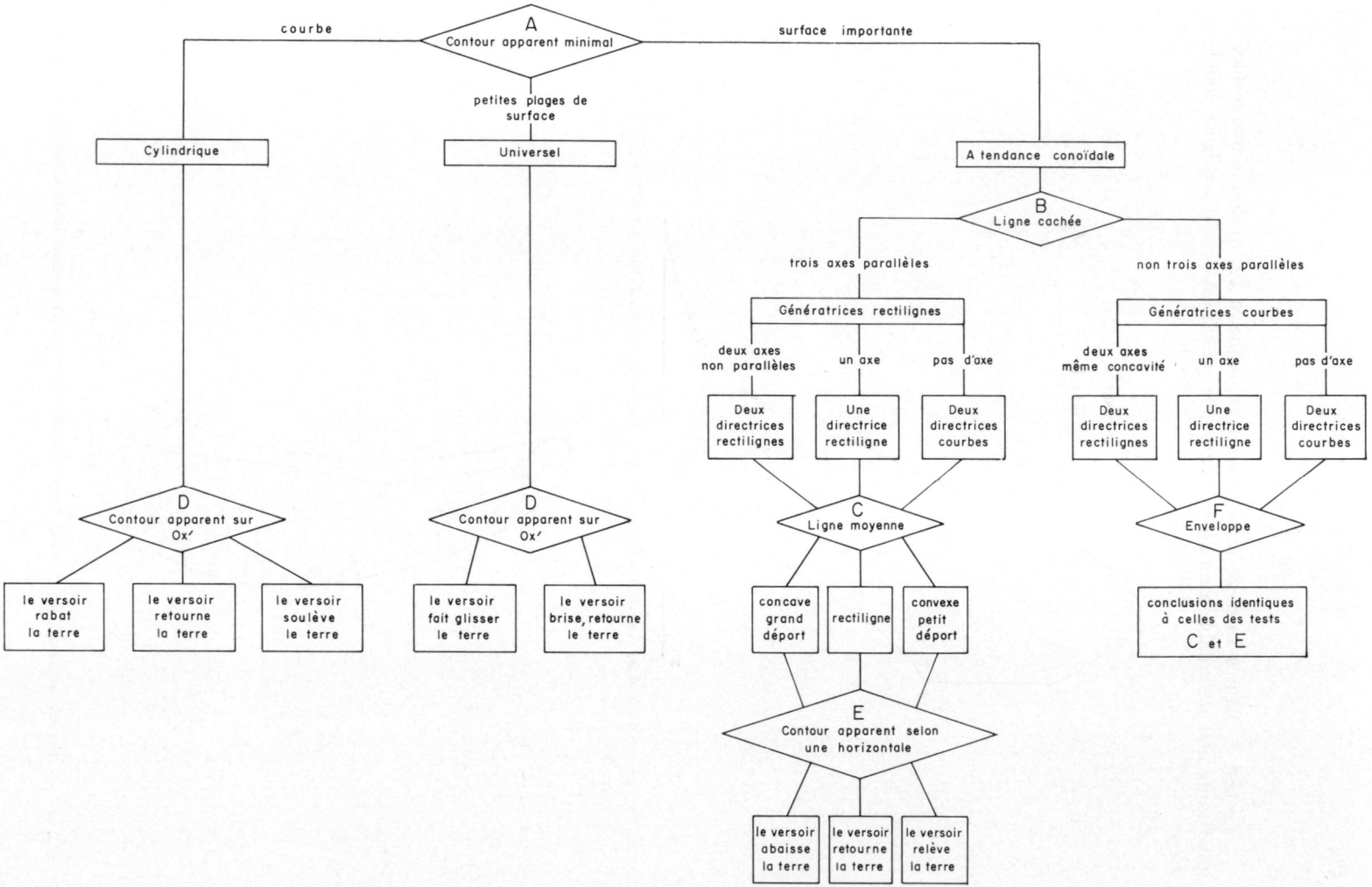


FIG. 18. — *Organigramme des tests d'identification.*

1. *Versoir de* SMALL.

Le test A, figures 19 et 20 (à la même échelle que la fig. 6) donne une surface importante non assimilable à un arc de courbe, ce versoir est donc à tendance conoïdale.

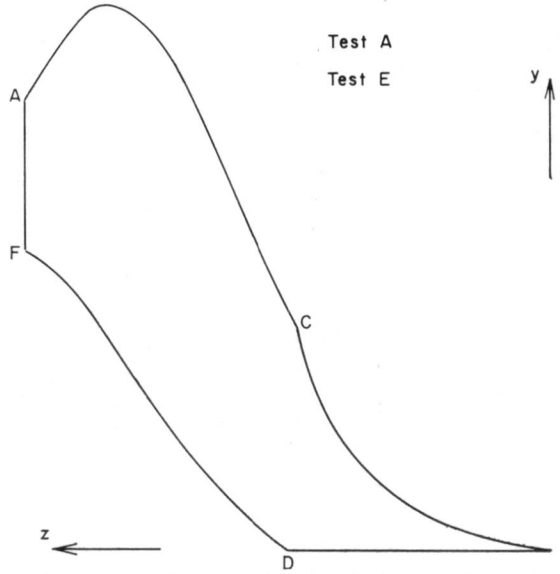


FIG. 19. — *Versoir de Small.* Application de la méthode des tests. Projection sur le plan yOz.

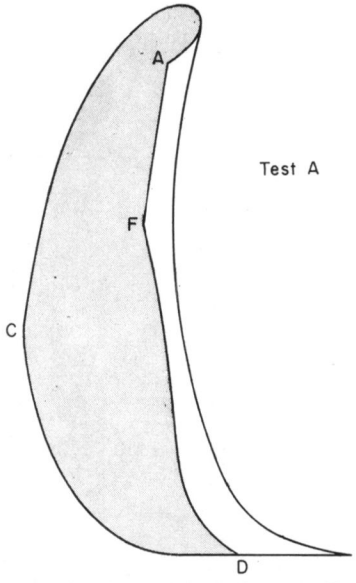


FIG. 20 — *Versoir de Small.* Application de la méthode des tests. Projection horizontale parallèlement au plan de la chaînette.

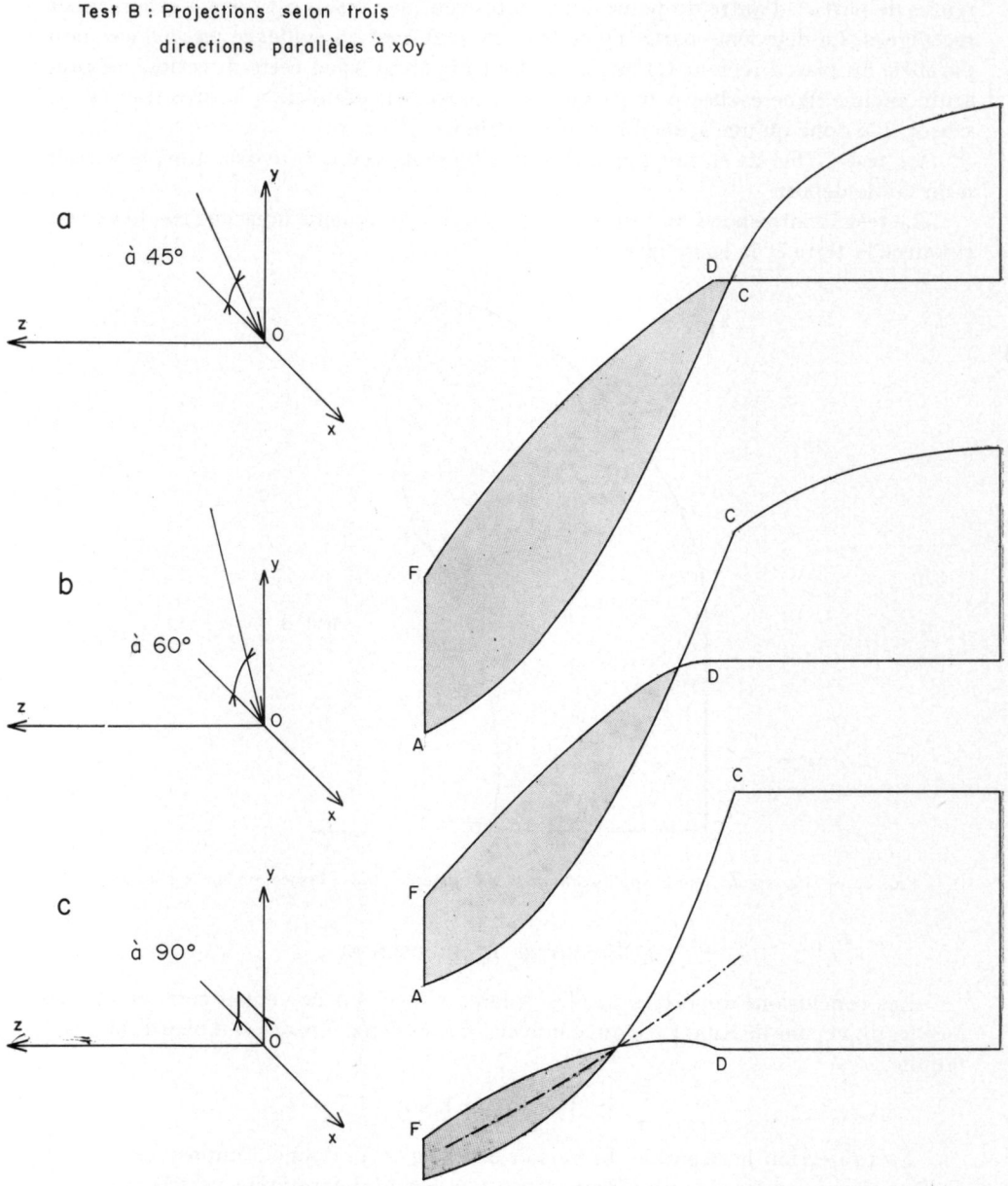


FIG. 21. — *Versoir de Small.* Application de la méthode des tests. Projections selon trois directions parallèles à *xOy*.

Le test B, test de la ligne cachée (figure 21, *a*, *b*, *c*) a été effectué selon trois axes parallèles au plan xOy, dont les directions sont précisées sur la figure. Ces trois contours apparents ne présentent aucune ligne cachée, les concavités sont différentes de part et d'autre du point double apparent, le versoir est donc à génératrices rectilignes. La deuxième partie de ce test (fig. 22), met en évidence un seul axe non parallèle au plan directeur tel que le contour apparent selon cette direction ne présente aucune ligne cachée pour ce versoir. Cet axe est parallèle à la direction Oz, le versoir n'a donc qu'une seule directrice rectiligne.

Le test C (fig. 21 *c*), fait apparaître une ligne moyenne convexe, ainsi le versoir a un faible déport.

Le test E correspond au test A (fig. 19) où il n'y a aucune ligne cachée, le versoir retourne la terre et la laisse glisser.

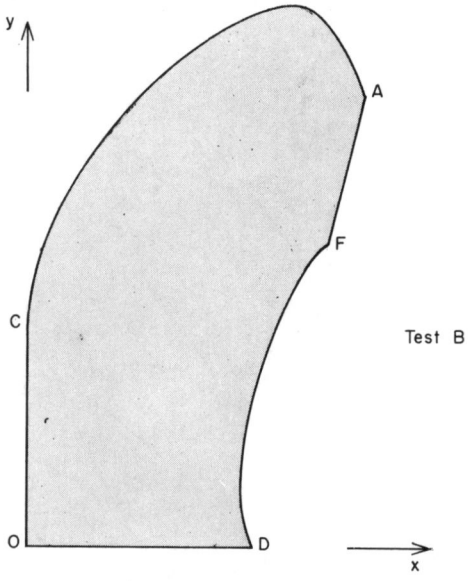


FIG. 22. — *Versoir de Small.* Application de la méthode des tests. Projection sur le plan xOy.

2. *Versoir de* LAMBRUSCHINI

Les conclusions apportées par les différents tests sur ce versoir sont identiques à celles du versoir de SMALL, ce qui confirme que les deux versoirs sont bien de la même famille.

3. *Versoir de* KNOX

La projection horizontale du versoir seul (fig. 11), donne l'impression que la surface de ce versoir est cylindrique, avec une légère déformation vers la queue du versoir. Cette projection répond au test A : le versoir est universel.

Le test D est étudié par la figure 23 où la projection de la surface dans la direction Ox' de la ligne de contact soc-versoir fait apparaître une surface du deuxième type. Le versoir de KNOX tend à briser et à retourner la terre.

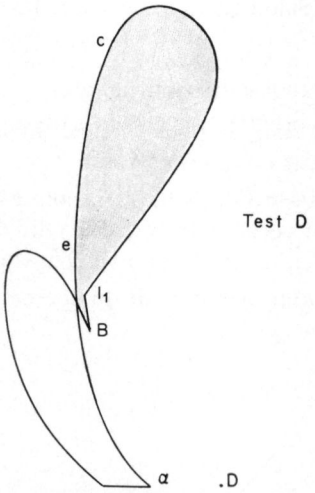


FIG. 23. *Versoir de Knox.* Application de la méthode des tests. Projection dans la direction de la ligne de contact soc-versoir.

4. *Versoir de* MEAD

Le test A (fig. 24) met en évidence un contour apparent rappelant une surface cylindrique « déformée » et conduit à conclure que le versoir de MEAD est universel.

Le test D (fig. 25) fait apparaître un versoir du deuxième type.

Le versoir de MEAD tend, comme celui de KNOX, à briser et à retourner la terre.

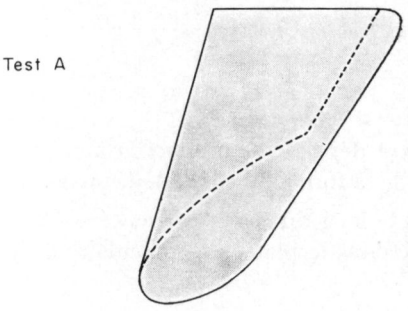


FIG. 24. — *Versoir de Mead.* Application de la méthode des tests. Projection sur le plan xOz.

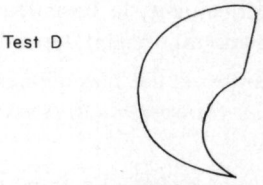


FIG. 25. *Versoir de Mead.* Application de la méthode des tests. Projection dans la direction de la ligne de contact soc-versoir.

VI. — CHOIX DES GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES

A. — *Étude de* DALLEINNE

Pour caractériser de façon plus pratique un versoir donné par sa forme géométrique et son action sur le sol, il convient de définir quelques grandeurs facilement mesurables, telles que angles ou longueurs. Dans une note faisant le point de l'évolu-

tion des versoirs après le Salon agricole de 1962, DALLEINNE propose les grandeurs suivantes :

1. *Soulèvement par le soc* (angles du soc) (fig. 26).

α) *Angle d'entrure* (α) dans le plan vertical du sep. — Il correspond à la direction initiale de cheminement de la terre.

β) *Angle d'attaque* du soc (β). — La variation de cet angle est en relation directe avec la largeur de travail et permet une réduction des dimensions du corps de charrue. Il est évidemment la cause initiale du mouvement du sol dans la direction Ox.

γ) *Angle du dièdre* formé par le plan du soc avec le plan horizontal, ou angle d'entrure du dièdre (μ).

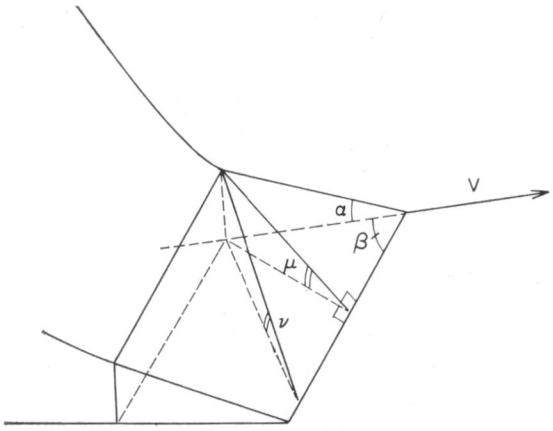


FIG. 26. — *Grandeurs caractéristiques de Dalleinne.* Angles du soc.

2. *Basculement.*

Théoriquement, le basculement de la terre dépend du rapport profondeur sur largeur de travail, mais il dépend en pratique de la forme du corps de charrue.

α) *Sur le soc.* Le basculement est amorcé le long du soc et influencé par *l'angle de la section transversale du soc* (ν), angle situé dans le plan perpendiculaire au plan du sep.

β) *Sur le versoir.* Le basculement sur le versoir est influencé notamment par trois angles (fig. 27).

— *angle moyen du versoir* (γ) qui intervient dans la détermination de la trajectoire de la partie centrale de la bande de terre ;

— *angle du bord supérieur* (δ) qui intervient dans la détermination de la trajectoire de la partie supérieure de la bande de terre ;

— *angle de fuite du bord inférieur* (ε) qui intervient dans la détermination de la trajectoire de la partie inférieure de la bande de terre.

Détermination de ces trois angles pour un versoir quelconque :

La figure 28 définit les longueurs nécessaires pour exprimer simplement ces trois angles.

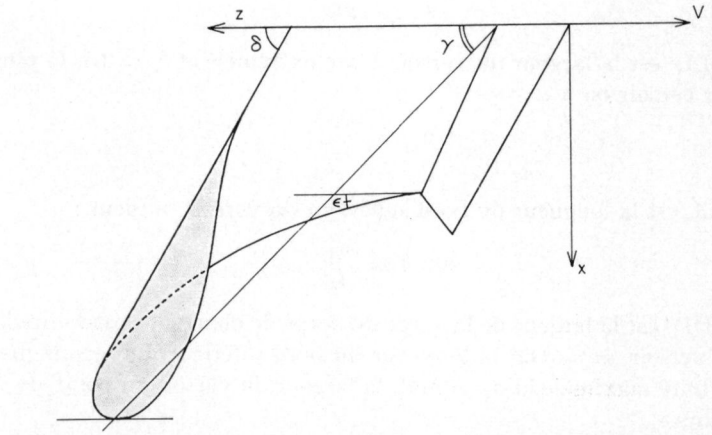


FIG. 27. — *Grandeurs caractéristiques de Dalleine.* Éléments principaux d'un versoir.

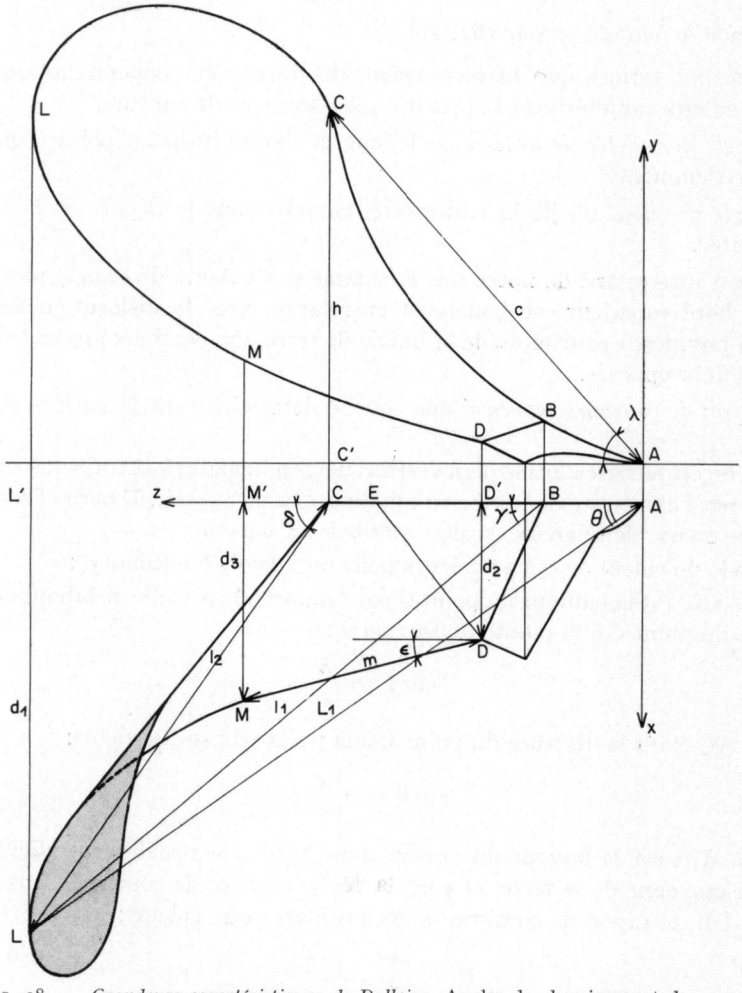


FIG. 28. — *Grandeurs caractéristiques de Dalleine.* Angles de cheminement du versoir.

Si $d_1 = LL'$ est la largeur du versoir à son extrémité et $l_1 = BL$ la plus grande dimension du versoir on a :

$$\sin \gamma = \frac{d_1}{l_1}$$

Si $l_2 = CL$ est la longueur du bord supérieur du versoir, il vient :

$$\sin \delta = \frac{d_1}{l_2}$$

Si $d_2 = DD'$ est la largeur de la gorge du corps de charrue, c'est-à-dire la largeur minimale du versoir, $m = DM$ la longueur du bord inférieur du versoir jusqu'à son point de courbure maximale et $d_3 = MM'$ la largeur du versoir au point de courbure maximale, alors :

$$\sin \varepsilon = \frac{d_3 - d_2}{m}$$

3. *Dislocation le long du versoir* (fig. 28).

Dalleinne estime que le phénomène de dislocation dépend notamment de quatre grandeurs caractérisant l'apparition des surfaces de rupture.

α) *Angle de montée de la terre* (λ) le long de l'arête jusqu'au point d'inflexion C défini précédemment,

β) *angle résultant* (θ) de la trajectoire, caractérisant le déport de la bande de terre labourée.

γ) Il est intéressant de noter que la somme des valeurs de l'angle moyen et de l'angle du bord supérieur est également en relation avec la dislocation des mottes pendant la première « courbure » de la bande de terre. Or, ces deux angles ont séparément des effets opposés.

δ) *Rayon de courbure moyen* d'une courbe déterminée sur la surface de versoir universel.

Ce rayon est mesuré dans le plan vertical perpendiculaire à la trajectoire moyenne et passant par l'extrémité de l'intersection du soc et du versoir. Il permet d'apprécier le caractère creux, demi-creux ou plat attribué au versoir.

Méthode de calcul de ces grandeurs pour un versoir quelconque :

Si $h = CC'$ est la hauteur du point C par rapport à la semelle de labour et $c = CA$ la distance du point C à la pointe du soc, on a :

$$\sin \lambda = \frac{h}{c}$$

$L_{l_1} = AL$ étant la distance du point L à la pointe du soc, il vient :

$$\sin \theta = \frac{L_{l_1}}{d_1}$$

Si $p = DE$ est la largeur du versoir dans le plan vertical perpendiculaire à la trajectoire moyenne de la terre, et q est la flèche de l'arc de courbe DE par rapport à la corde DE, le rayon de courbure moyen a alors pour valeur :

$$R = \frac{p^2}{8q} + \frac{q}{2}$$

TABLEAU I

Valeurs moyennes des caractéristiques selon DALLEINNE

Angles en degrés	L pouces				
	10	11	12	14	16
α	20,7	22	22	25,5	25,5
β	36,5	40	41,5	42	42
μ	32	34	32,5	35,5	35,5
ν	27	26,5	29,5	30	26,5
θ	25	—	26	—	29
d_2 cm Universel	—	—	21,5	25	26,5
d_2 cm ou Cylindrique Hélicoïdal	17	17	17	—	—
R cm			36 universel	44 cylindrique	

TABLEAU 2

Valeurs moyennes des caractéristiques selon DALLEINNE

Angles en degrés	Versoir			
	Cylindrique	Universel	Semi-hélicoïdal	Hélicoïdal
ν	28,8	28	27	26,5
δ	53	46	46	46
ε	26	21	18	18
λ	40	34	34	31
$\gamma + \delta$	88	77	—	81

4. *Dégagement de la raie de labour.*

La largeur arrière du corps de charrue influe principalement sur le dégagement de la raie, mais il faut tenir compte de la hauteur du point L au-dessus de la semelle de labour.

5. *Dislocation à l'extrémité du versoir.*

α) La largeur arrière du versoir, associée à la hauteur du bord inférieur, intervient comme précédemment. Un corps peut émietter la terre, par son bord inférieur ou postérieur, quand il est trop large.

β) L'angle de fuite du bord inférieur du versoir (ε) peut agir sur les mottes de la base de la bande.

γ) L'angle du bord postérieur du versoir est assimilable à l'angle du bord supérieur δ.

6. *Adhérence au versoir.*

L'adhérence des terres argileuses sur les outils dépend évidemment de l'état de la surface des versoirs, mais également de leurs formes géométriques. Elle dépend donc des caractéristiques suivantes :

— longueur du corps de charrue ;
— angles de « cheminement » de la terre ;
— divers rayons de courbure.

L'adhérence dépend en outre des dimensions de la gorge entre soc et versoir, et de la surface de ce dernier.

α) Gorge du versoir.

La gorge est définie par sa largeur d_2.

β) Surface et largeur du versoir.

La détermination de l'aire de la surface présente des difficultés certaines, car elle exige la connaissance de son équation, mais il est évident que l'adhérence de la terre sur le versoir en est fonction.

Résultats numériques :

DALLEINNE a effectué un grand nombre de mesures de tous ces éléments et les valeurs moyennes obtenues sont rassemblées dans les tableaux 1 et 2.

Rappelons qu'un versoir est dit « n pouces » si la largeur de la raie de labour faite par celui-ci est de n pouces.

Il est également intéressant pour le basculement de faire apparaître les différentes valeurs des quantités $\delta - \gamma$ et $\varepsilon - \delta$ selon la forme des versoirs. Les valeurs moyennes numériques de ces quantités sont données dans le tableau 3.

B. — *Éléments caractéristiques intrinsèques*

Il apparaît très clairement que les grandeurs proposées par DALLEINNE sont non seulement trop nombreuses, mais en outre ne sont pas toutes indépendantes. De plus, il semble opportun, ici encore, de distinguer entre elles les grandeurs ayant une influence sur la cinématique des particules de celles ayant une influence sur la dynamique du mouvement.

1. *Caractéristiques cinématiques.*

a) *Soulèvement par le soc.*

Seuls sont à conserver (fig. 26) les angles α et γ, qui sont directement mesurables. On en déduit immédiatement l'angle μ par la relation :

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta}$$

b) *Retournement.*

Le retournement de la terre est une notion qualitative dont il est souhaitable de préciser la signification. Il peut être défini par l'angle de rotation globale $\pi - \psi$ (fig. 29) que font entre elles les positions d'un même élément de la bande de terre dans le plan xOy avant et après le passage de l'outil.

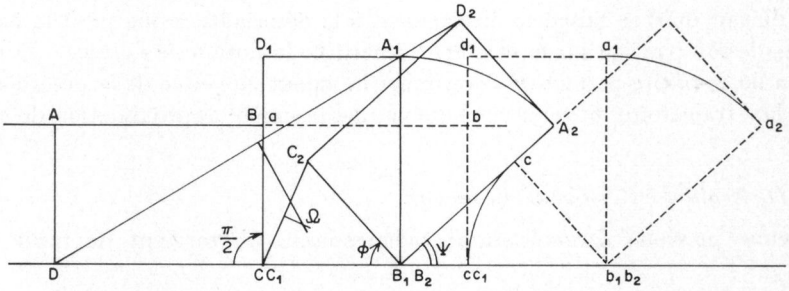


FIG. 29. — *Mouvement global de la section droite.* Angle de basculement.

L'angle ν proposé par DALLEINNE n'est pas intrinsèque car il dépend des angles α et β précédemment définis, en effet :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}$$

Les angles γ, δ et ε définissant les conditions initiales des trajectoires des particules sont des grandeurs intrinsèques. Ces angles introduisent la notion de courbe limite des surfaces totalement absente dans l'étude de WHITE, comme il a été mentionné précédemment au chapitre II.

c) *Dégagement de la raie de labour.*

Le dégagement de la raie de labour peut être défini par un coefficient sans dimension (coefficient de dégagement de la raie) rapport de la largeur arrière du versoir LL′ à la largeur de travail exprimée en centimètres et non en pouces contrairement aux normes agronomiques. Cette notion de dégagement est fonction notamment de la quantité $D = \frac{L - l}{h}$ où L représente la largeur arrière du versoir, l la largeur de travail et h la hauteur du point L (fig. 28) au-dessus de la sole de labour.

Ainsi pour les versoirs universels de 12 pouces pour lesquels DALLEINNE donne LL′ = 42 cm et h = 18,5 cm en moyenne, il vient $D = \frac{42 - 30}{18,5} = 0,65$, alors que pour les versoirs cylindriques de 16 pouces, les valeurs moyennes de ces quantités sont : LL′ = 57 cm et h = 23 cm, ainsi $D = \frac{57 - 48}{23} = 0,39$.

Ces derniers versoirs ont donc tendance à donner un moins bon dégagement que les précédents, toute chose égale par ailleurs.

2. *Caractéristiques dynamiques.*

a) *Dislocation le long du versoir.*

Les angles γ et δ étant précédemment définis, leur somme n'est pas une nouvelle caractéristique intrinsèque, même si elle intervient comme facteur influant sur la dislocation des mottes sur le versoir.

Les angles λ et θ sont de nouvelles données géométriques indépendantes et peuvent à ce titre être considérés comme caractéristiques de la tendance qu'a le versoir à disloquer la terre.

Le rayon de courbure moyen défini par DALLEINNE est particulièrement intéressant du fait qu'il se rapporte directement à la déformation que subit la bande de terre lors de son passage sur le versoir. Il quantifie la notion de « creux » du versoir. Ce rayon de courbure permet de déterminer la valeur moyenne de la déformation le long de la « trajectoire moyenne » et donne une première approximation de sa grandeur.

b) *Dislocation à l'extrémité du versoir.*

Aucune nouvelle caractéristique indépendante n'intervient de façon intrinsèque.

c) *Frottement sur le versoir.*

Outre les angles de cheminement précédemment définis, il est évident que la surface du versoir intervient de façon primordiale tant par sa rugosité que par sa grandeur.

d) *Efforts de traction.*

Dans le tableau 3, DALLEINNE donne des résultats numériques concernant une combinaison linéaire des trois angles γ, δ et ε. Cette combinaison n'est pas en elle-même intrinsèque, même si elle est très « parlante » pour un praticien, mais ce tableau fait intervenir la notion de « versoir fuyant » qu'il convient de préciser par un critère. Le caractère fuyant d'un versoir peut être défini par le produit, rapporté à la largeur

TABLEAU 3

Valeurs moyennes des caractéristiques de DALLEINNE

	Versoir cylindrique 12 p.	Versoir cylindrique 16 p.	Versoir universel peu fuyant	Versoir universel fuyant	Versoir semi-hélicoïdal	Versoir hélicoïdal	Versoir hélicoïdal très contourné
$\delta - \gamma$	14,5°	26	14,3°	10,5°	11,3°	11,5°	25
$\varepsilon - \delta$	28	32	23	23,5°	22	26	35

de travail unitaire exprimée en cm, de la largeur arrière du corps de charrue (LL′) par la hauteur du point L au-dessus de la sole (fig. 28). Ce coefficient de fuite (exprimé en cm² par cm) se rattache à la notion de portance dans la direction horizontale Oz′. Il est donc un facteur intéressant dans la détermination des forces de traction mises en jeu. Il convient de préciser que plus un versoir est « fuyant », plus le coefficient de fuite est faible.

CONCLUSION

Si le mérite d'avoir été le premier à présenter une classification revient à WHITE, il est indéniable que les travaux de DALLEINNE ont fait progresser de façon considérable l'étude de la géométrie des versoirs. Le premier auteur n'a considéré que l'aspect mathématique des surfaces et n'a que très peu pris en considération l'aspect mécanique de leurs actions sur le sol. Le second auteur aborde cette étude en praticien expert et apporte un certain nombre de notions fondamentales. En premier lieu, une classification des surfaces, plus générale que celle de WHITE, qui tient compte non seulement de la forme géométrique du versoir, mais aussi de son action sur le sol. Cette classification a rendu nécessaire une définition de grandeurs caractéristiques permettant notamment de limiter la surface mathématique considérée par WHITE. Ces grandeurs permettent, par leur mesure, une comparaison quantitative des actions cinématiques de chaque versoir et rendent plus efficace et plus utile la classification proposée. En ne considérant que les grandeurs intrinsèques, le nombre de paramètres intervenant pour chaque versoir est de 12, alors que WHITE n'a utilisé en moyenne que trois paramètres pour écrire l'équation des versoirs.

Dans l'équation de la surface d'un versoir, supposée connue, interviendrait sous une forme ou l'autre, trois paramètres de DALLEINE α, β et R. Pour limiter cette surface et la rendre utilisable en pratique il est nécessaire de considérer les neuf autres paramètres intrinsèques dont l'expression mathématique serait rendue possible par la connaissance des équations des surfaces d'intersection.

Au cours de cette étude sont apparues les diverses actions que peut avoir un versoir telles que « rabattement, retournement, soulèvement etc. » qui montrent la complexité du mouvement du sol au cours d'un labour. Cette diversité de phénomènes est la cause initiale des difficultés rencontrées tant par le praticien que par le chercheur, c'est pourquoi ce dernier a tenté de simplifier les données du mouvement et d'éliminer telle ou telle action du versoir. Selon les simplifications adoptées, donc selon les hypothèses choisies, les études se sont orientées différemment.

Les versoirs étant ainsi classés et caractérisés par des paramètres intrinsèques, il est opportun de répertorier les hypothèses formulées sur le comportement du sol selon les orientations choisies. Les conclusions qui en découlent notamment au sujet du retournement, des trajectoires et des critères d'écoulement seront analysées au cours d'un prochain article.

GLOSSAIRE

Dans le but futur de pouvoir quantifier les diverses actions cinématiques des versoirs, nous proposons, à l'aide des composantes du déplacement des particules, une définition provisoire et succincte de chacune d'elles.

Le déplacement d'une particule est caractérisée par ses trois composantes u, v et w.

Actions d'un versoir. Ces actions concernent les déplacements du centre de la section droite :

— abaisser : $\dot{v}$ est en premier lieu positif, s'annule et devient négatif à la sortie du versoir ;

— laisser glisser : $\dot{v}$ est en premier lieu positif puis devient nul ;

— rabattre : action combinée de « abaisser » et « retourner » ;

$\dot{v}$ en premier lieu positif puis négatif, mais u est grand par rapport aux autres composantes.

— retourner : u est grand par rapport à v et w ;

— soulever : $\dot{v}$ toujours positif ;

— déport : déplacement sur Ox, rapporté à la largeur de travail unitaire du centre de gravité de la section droite : $\frac{u_G}{L}$.

Ligne moyenne d'un versoir : courbe équidistante des lignes définissant le contour apparent horizontal de la surface du versoir.

Reçu pour publication en novembre 1969.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO STUDIES OF THE EFFECT OF A MOULDBOARD ON SOIL

I. — STUDY OF THE GEOMETRICAL DISPOSITION OF MOULDBOARDS. CLASSIFICATION

The paper includes a critical bibliographical study designed to summarize results obtained by workers studying the behaviour of soil when turned by a mouldboard.

The writer proposes a series of examinations giving rise to identification tests in order to differentiate the various types of mouldboard by geometrical or mechanical characteristics.

Some simple hypotheses are advanced for studying trajectories but are clearly inadequate.

The need to use theories relating to the mechanics of a deformable medium is shown by observations ; the conclusions will be referred to in part two.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DER WIRKUNG EINES STREICHBLECHES AUF DEN BODEN

I. — UNTERSUCHUNG DER GEOMETRISCHEN ANORDRUNG DER STREICHBLECHER-KLASSIFIZIERUNG

Es handelt sich in dieser Arbeit um eine kritische bibliographische Untersuchung mit dem Ziel die Ergebnisse zu präzisieren, die wäherd Untersuchungen des Verhaltens eines mit Streichblech bearbeiteten Bodens gefunden wurden.

Eine Reihe von Prüfungen mit den dazu gehörenden Identifikationsproben werden vorgeschlagen, um die verschiedenen Streichblechgattungen je nach ihren geometrischen oder mechanischen Charakteristiken zu bestimmen.

Um die Kurve des Streichbleches zu bestimmen, werden einige einfache Hypothesen vorgeschlagen, deren Unzulänglichkeit offenbar ist.

Die Notwendigkeit, die mechanischen Theorien eines deformierbaren Milieus anzuwenden, wird an Hand von verschiedenen Beobachtungen gezeigt, deren Schlussfolgerungen im Laufe des zweiten Teiles ausgewertet werden.

К изучению действия отвала на почву.

А. ФОР.

РЕЗЮМЕ

Первая часть данной работы представляет критическое изучение библиографических данных, проведенное для уточнения результатов полученных различными исследователями по поводу поведения почвы подверженной действию отвала плуга.

Для точного определения различных категорий отвалов в зависимости от их геометрических и математических признаков, автор предлагает комплект исследований включающих тесты опознавания и несколько простых, но конечно далеко недостаточных гипотез для изучения траекторий.

Необходимость применения механических теорий деформирующейся среды доказывается автором при помощи некоторого количества наблюдений, выводы из которых будут представлены во второй части труда.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAVER L. D., 1956. *Soils physics.* John Wiley and Sons Ed., New-York, 489 pp.

DALLEINNE E., 1962. *Notes pour le siège*, n° 904, 1228.

DEMOLON A., 1946. *L'évolution scientifique et l'agriculture française.* Flammarion éd., 196-222.

HAUDRICOURT G., JEAN-BRUHNES DELAMARRE M., 1965. *L'homme et la charrue à travers le monde.* Gallimard.

HÉNIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural.* Éd. des Ingénieurs agricoles, Paris, 319 p.

JEAN-BRUHNES M., 1910. *La géographie humaine*, 3 volumes. Paris, éd. abrégée 1942, 345 p., P. U. F.

KUIPERS H., 1963. The objectives of soil tillage. *Neth. J. Agric., Sci.*, **11**, 91-96.

SOHNE W. H., 1966. Characterization of tillage tools. *Proc. internation. on characterization problems in soil tillage*, 31-48.

WHITE E. A., 1918. A study of the plow bottom and its action upon the furrow slice. *J. Agric. Research*, **12**, 149-182.

Ann. agron., 1969, **20** (6), 597-607.

MODALITÉS DU DESSÈCHEMENT DU SOL SOUS DES CULTURES PLANTÉES EN LIGNES ESPACÉES

J. PUECH, C. MAERTENS et J.-R. MARTY
avec la collaboration technique de M. HERNANDEZ et M. CABELGUENNE

Station d'Agronomie et d'Œnologie,
67, Boulevard Deltour, 31 - Toulouse
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La consommation d'eau du sol par des végétaux plantés en lignes relativement espacées, se fait assez souvent avec un gradient latéral de consommation, ce qui pose le problème du choix d'un point de mesure représentatif. L'établissement des bilans hydriques nécessite donc la connaissance préalable des modalités du dessèchement latéral du sol, en fonction de la culture et des caractéristiques du milieu.

I. — INTRODUCTION

La détermination au champ des besoins en eau des cultures par mesure directe nécessite que le point de référence choisi soit représentatif de l'ensemble étudié. Les profils hydriques obtenus doivent alors permettre l'établissement d'un bilan exact, en particulier en vue du déclenchement d'une irrigation. Or, de nombreuses expériences montrent qu'il existe fréquemment des écarts de consommation entre la ligne et l'interligne. Cela pose donc un important problème d'ordre pratique dans le choix du ou des emplacements de mesure, lorsque la culture est en lignes relativement espacées. Cela nous a amené à comparer les résultats obtenus dans divers essais au champ, sur des cultures annuelles irriguées et sur un verger.

Le problème revêt aussi un aspect d'ordre théorique, dans la mesure où il s'agit de connaître la nature des mécanismes mis en jeu lors du dessèchement d'un sol donné, sous certaines conditions culturales. Nous avons donc entrepris une expérience en vue d'analyser les modalités du dessèchement du sol, en profondeur et latéralement, sous l'effet de la succion réalisée à partir d'une zone à fort enracinement. Toutefois, au niveau d'approche considéré, les résultats rapportés ici ne peuvent pas résoudre l'ensemble des problèmes posés, ni démontrer complètement les mécanismes en jeu.

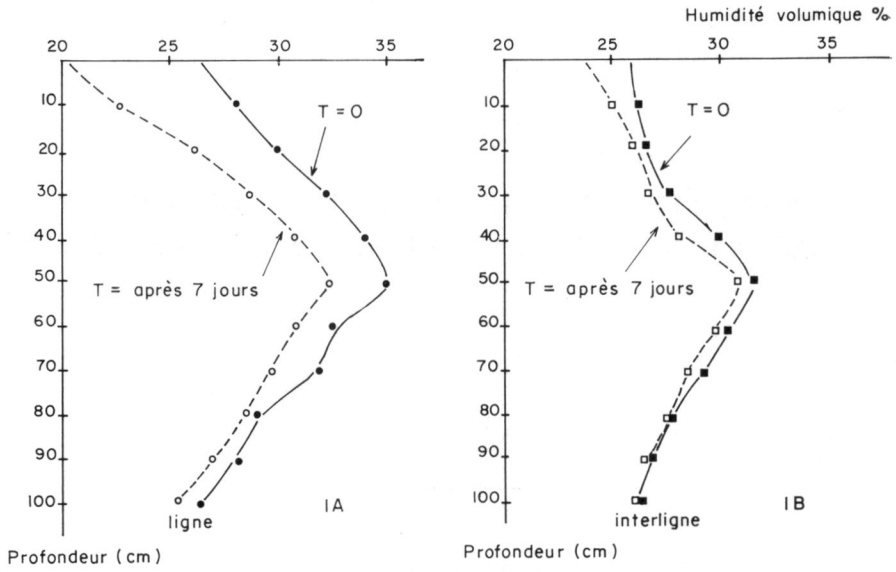


FIG. 1. — *Modalités de la consommation de l'eau par le maïs sous la ligne et dans l'interligne* (espacement des lignes : 90 cm)

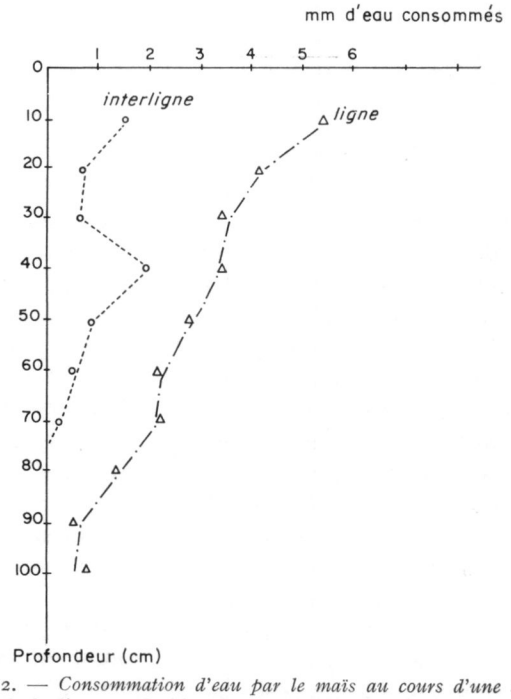


FIG. 2. — *Consommation d'eau par le maïs au cours d'une semaine* (cas de la ligne et de l'interligne, espacement des lignes : 90 cm) (80 jours après la levée)

II. — CONSOMMATION D'EAU PAR DES CULTURES PLANTÉES EN LIGNES

1. *Cas de cultures annuelles à enracinement progressif*

De nombreuses mesures effectuées avec la méthode neutronique notamment (MAERTENS *et al.*, 1965), ont mis en évidence dans le cas de cultures irriguées, une consommation différentielle entre la ligne et l'interligne (COURAU *et al.*, 1966).

Les figures 1 A et 1 B montrent par exemple les profils hydriques obtenus à une semaine d'intervalle, à l'aide de tubes placés dans la ligne et l'interligne, dans le cas d'une culture de maïs. L'essai était réalisé avec un écartement de 90 cm entre lignes et un peuplement de l'ordre de 70 000 pieds/ha, et mené en régime voisin de l'E. T. M.

La figure 2 montre, sur une profondeur de 1 m, la valeur des consommations obtenues sur la ligne et à 45 cm de cette dernière. Il apparaît une différence non négligeable, et cet écart dans l'utilisation de l'eau du sol par les plantes nous a alors amené, avec la méthode employée, à effectuer des plantations en carré autour du tube de mesure. Ce dernier est placé au point de rencontre des diagonales formées par 4 pieds de maïs ; de cette manière, la consommation et la répartition de l'eau sont plus régulières. On peut donc espérer réaliser valablement des bilans à partir d'un seul tube dans ce type de culture ; mais pour d'autres cultures (exemple : vergers) se pose le problème de la distance minimale à respecter.

2. *Cas des cultures à enracinement permanent* (Vergers)

Si l'on considère le cas de cultures ayant un enracinement permanent (exemple : vergers), le terrain est mieux colonisé au cours du temps que précédemment. Il est important de savoir s'il existe aussi un gradient de consommation, étant donné les écartements de plusieurs mètres souvent rencontrés. D'après certaines observations (MAERTENS *et al.*, 1966), ceci semble bien se produire ; en effet, dans le cas d'un verger de pêchers sur sol sableux profond, des traces très importantes de lessivage du fer au centre de l'interligne humide ont été relevées, alors que ces caractères s'atténuaient en se rapprochant des arbres, où le sol était plus sec.

Pour analyser ce comportement, des tubes de mesure (fig. 3) ont été installés dans un verger de pêchers *Red Haven*, irrigué sur frondaison et non enherbé. Un tube (B) était placé dans l'interligne et deux autres tubes (A et C) étaient placés respectivement à 50 cm du pied de chaque arbre. Les arbres étaient espacés de 6 m et plantés en carré. En considérant le bilan global établi pendant la période d'arrosage et de pleine activité végétative (entre début juin et début septembre) on a noté une perte d'eau du sol de 170 mm en A et 174 mm en C près des arbres, contre 121 mm en B dans l'interligne. Dans ce verger, on peut alors penser que la consommation mesurée en D (fig. 3) aurait été également inférieure, puisque le point est situé à plus de 4 m de tout arbre.

La connaissance précise des consommations, nécessiterait donc une intégration dans l'espace, de la courbe enveloppe obtenue à partir de plusieurs tubes. Mais

d'autres éléments peuvent encore perturber le bilan, par exemple l'apport d'eau supplémentaire au pied de l'arbre, par effet collecteur de la frondaison ; les consommations réelles seraient alors supérieures à celles mesurées dans cette expérience. Ce phénomène a été observé sur maïs ; la ligne avait une consommation préféren-

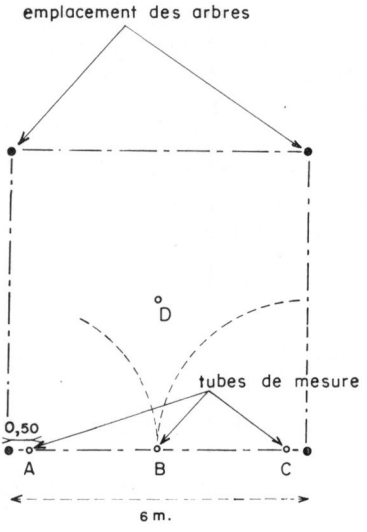


FIG. 3. — *Emplacement des tubes de mesure* (A B C) *de l'humidimètre à neutrons dans un verger* (Pêchers) *planté en carré*

tielle et recevait par effet « entonnoir » des feuilles, 4 à 8 fois plus d'eau que l'interligne (COURAU *et al.*, 1966). Enfin d'autres facteurs, liés par exemple à l'hétérogénéité du milieu, peuvent aussi intervenir, tels que les effets de tassement observés dans l'interligne qui peuvent perturber les mouvements de l'eau.

L'ensemble des résultats ci-dessus montre donc que des précautions doivent être prises pour l'étude des consommations d'eau, puisque le bilan obtenu à partir des données d'un seul positionnement, même répété, peut être entaché d'une erreur systématique. Pour mieux analyser les mécanismes mis en jeu, une approche expérimentale, différente des précédentes, a été entreprise.

III. — MODALITÉS DU MOUVEMENT DE L'EAU VERS UNE ZONE A FORT ENRACINEMENT

La circulation de l'eau du sol, vers une zone à forte colonisation radiculaire, a été étudiée en utilisant une seule ligne de végétation, et en éliminant expérimentalement les facteurs perturbateurs, comme la pluie et l'évaporation du sol, pour pouvoir mettre en évidence les mouvements verticaux et latéraux, sous l'effet de la succion radiculaire essentiellement.

1. *Méthode utilisée*

Sur une longueur de 3 m, une double ligne de maïs, variété *Iowa 4417*, a été semée sur un sol argilo-limoneux, homogène, profond, et initialement à un taux d'humidité voisin de la capacité au champ. L'évolution verticale et latérale des réserves hydriques a été suivie à l'humidimètre à neutrons. Plusieurs tubes ont été disposés perpendiculairement à la ligne de culture à 0,50 m, 1,50 m, et 3 m, et un tube conservé sur la ligne même. Les pieds de maïs étaient en disposition alternée, de façon à réaliser un bon enracinement, notamment autour du tube (fig. 4). Pour limiter au maximum les infiltrations par les pluies et les pertes par évaporation du sol, celui-ci a été recouvert d'une feuille de polyéthylène, doublée de plaques d'isorel.

De plus, pour limiter l'effet « entonnoir », une collerette en plastique était placée à la base de chaque pied de maïs. Enfin, en cours de végétation, une fosse a été ouverte en bout de ligne pour observer l'enracinement. Par ailleurs, un tube de mesure placé en sol nu, a permis de suivre l'évolution des profils hydriques en conditions naturelles.

Du point de vue végétatif, le maïs s'est développé très rapidement et avec vigueur. Cette accélération a d'abord été due à l'élévation de température du sol, puis à un mécanisme d'auto-amplification ; l'avance dans le développement foliaire entraînant un accroissement de photosynthèse, et ainsi de suite (ROBELIN, 1963). La variété utilisée est arrivée à maturité près de 3 semaines avant la culture en plein champ. Il a été récolté une moyenne de 160 grammes de grains par épi, poids un peu supérieur à celui obtenu en grande culture à la même époque.

L'essai a été réalisé entre avril et octobre 1967. Durant cette année de sécheresse exceptionnelle, le déficit climatique décadaire a été permanent pour la période d'étude considérée (fig. 5). La pluviométrie a été très faible, la température, l'ensoleillement et l'évapotranspiration potentielle élevés.

2. *Modalités du dessèchement du sol*

a) *Évolution des profils hydriques sous la ligne.*

La figure 6 montre, à partir du profil hydrique initial, la progression de la dessiccation du sol pendant une période de végétation du maïs. Le dessèchement évolue régulièrement à partir de l'horizon de surface, et on obtient un emboîtement dans le temps des différents profils. Puis, assez vite, l'humidité dans les 25 premiers cm atteint un état sensiblement stationnaire, voisin du point de flétrissement permanent. A ce moment, le front de dessiccation continue à avancer presque uniquement en profondeur, ce qui semble correspondre à l'avancement des racines.

b) *Dessèchement du sol latéralement à la culture.*

Les profils hydriques effectués à différentes distances de la ligne de plantation, montrent une participation différenciée des réserves du sol. La figure 7 indique les pertes observées à différentes époques sur les 4 tubes de mesure. Lorsqu'on s'éloigne de la culture, les consommations diminuent et finissent par devenir assez faibles.

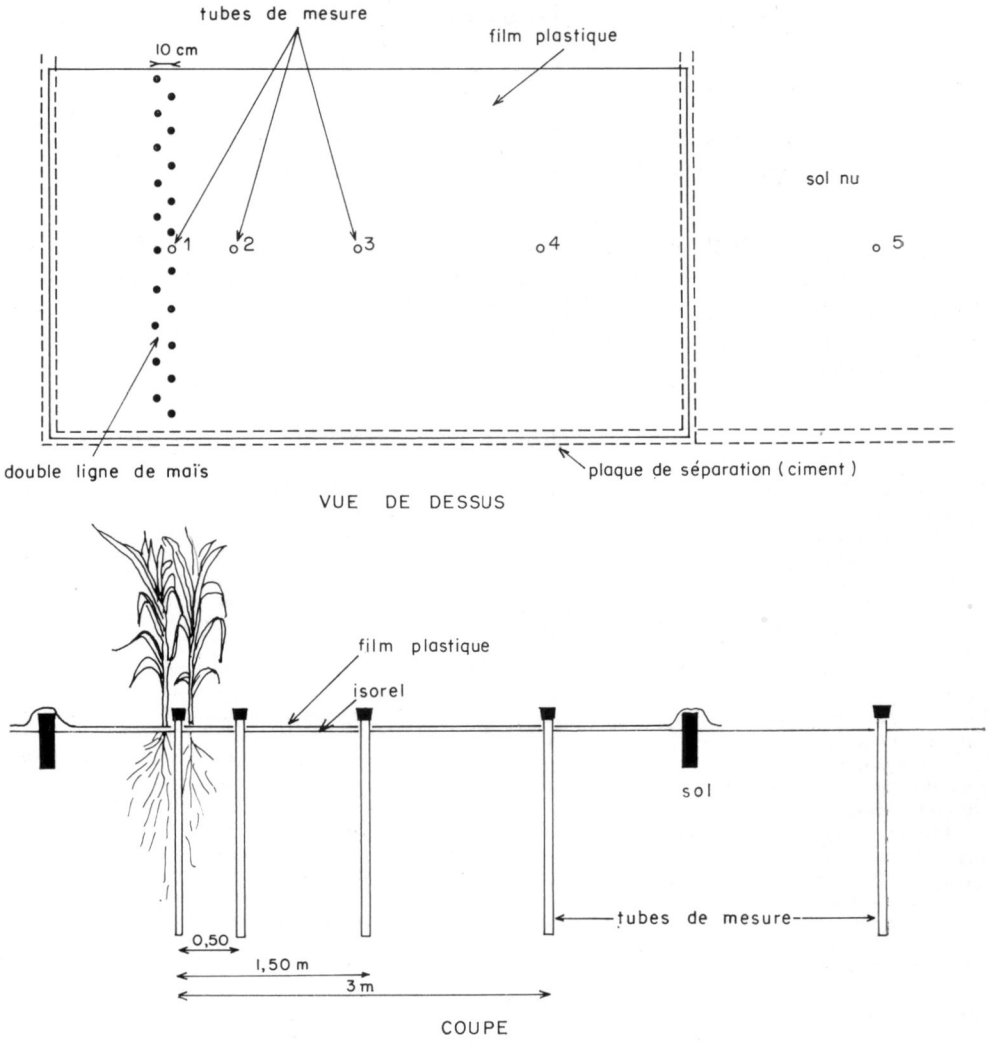


FIG. 4. — *Dispositif utilisé pour l'étude du mouvement de l'eau vers une zone à fort enracinement*

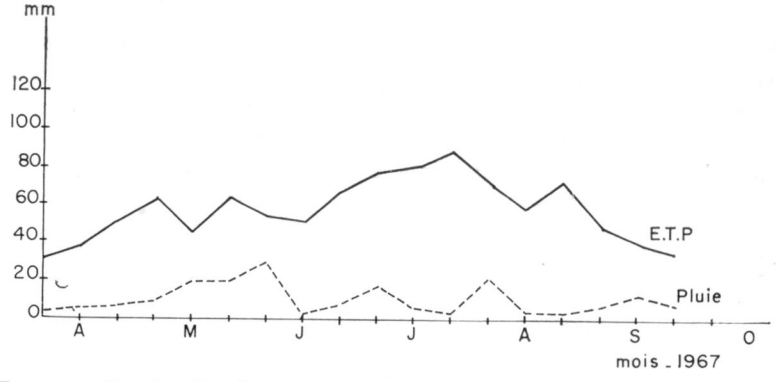


FIG. 5. — *Données climatiques: évapotranspiration potentielle et précipitations décadaires*

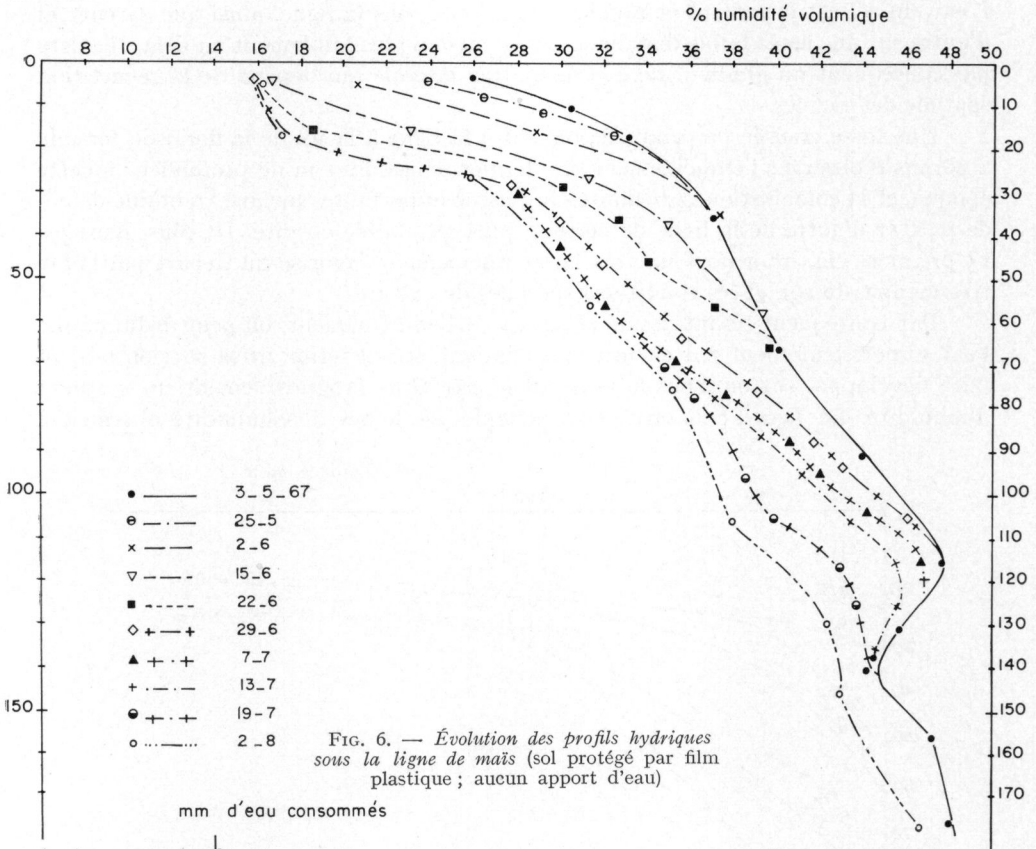


FIG. 6. — *Évolution des profils hydriques sous la ligne de maïs* (sol protégé par film plastique ; aucun apport d'eau)

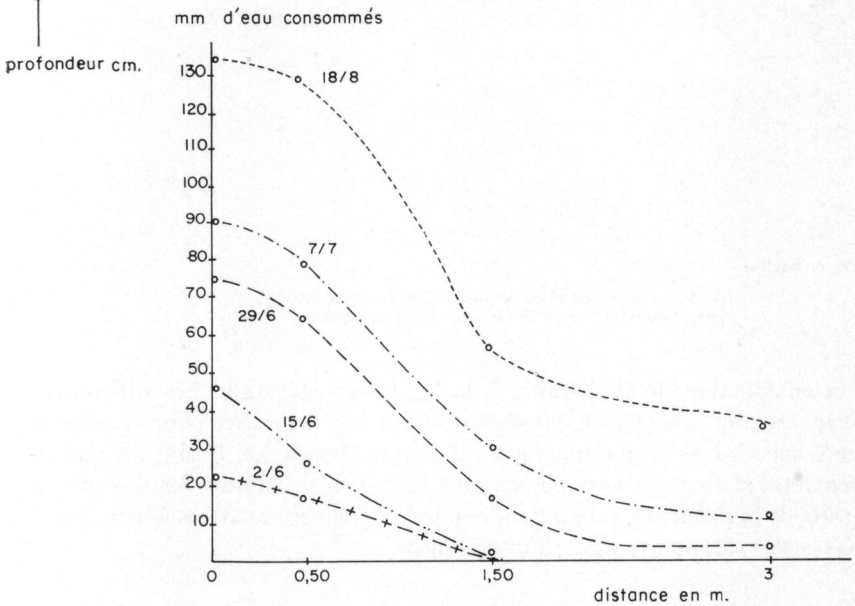


FIG. 7. — *Consommation d'eau à différentes époques, en fonction de la distance à la ligne de culture* (évaporation du sol freinée par film plastique)

L'eau du sol est fortement et rapidement utilisée sous la ligne, ainsi que de part et d'autre sur une assez faible distance, puis beaucoup plus faiblement au-delà. Il existe par conséquent un gradient de consommation latérale qui dépend de la répartition spatiale des racines.

Une fosse creusée perpendiculairement à la ligne à la fin de la floraison femelle a permis d'observer l'enracinement. Ce dernier dépassait 1 m de profondeur à cette époque, et la colonisation radiculaire était assez importante, sur une trentaine de cm de part et d'autre de la ligne de culture, puis très faible ensuite. De plus, dans les 15 premiers cm, on a noté un très fort enracinement favorisé au départ par l'état très meuble du sol, et les conditions spéciales de culture.

Par conséquent, étant donné la nature de l'enracinement, on peut déduire que l'eau circule lentement par cheminement latéral, sous l'action de la succion radiculaire développée surtout sous la ligne ; il se crée alors progressivement un gradient d'humidité. La figure 8 montre, par exemple, les lignes d'isohumidité obtenues à

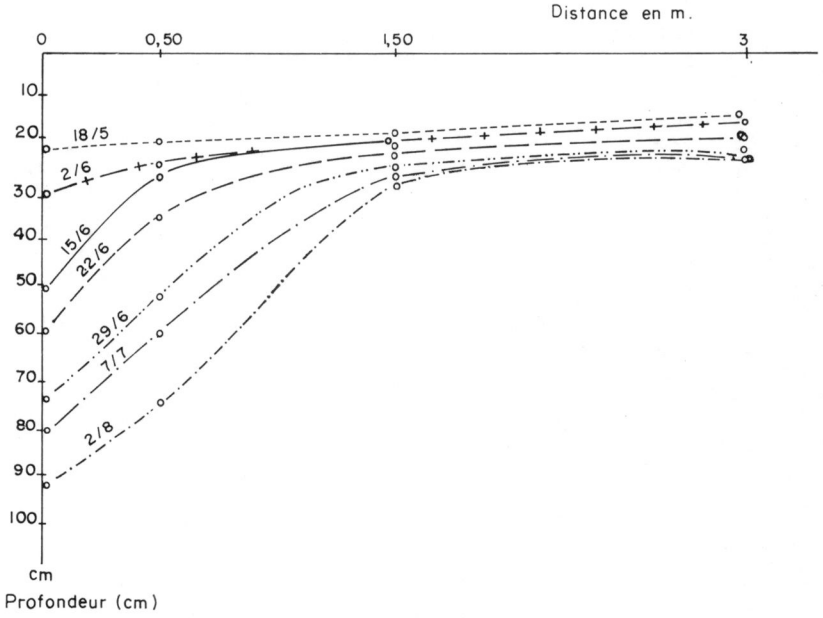


FIG. 8. — *Courbes d'isohumidité à différentes dates, en fonction de la distance à la ligne de culture*

diverses dates en fonction de la distance à la ligne de végétation. Les différences peuvent être encore plus accentuées, dans le cas où il y a concurrence pour l'eau entre plusieurs lignes successives et non une ligne de culture comme ici. Enfin, ces phénomènes peuvent être d'ampleur variable suivant les types texturaux, les teneurs en eau et l'intensité de la demande, si l'on tient compte de données relatives à la mobilité de l'eau dans les sols (MORIZET, 1967 ; PUECH, 1968).

IV. — DISCUSSION ET CONCLUSION

Les données expérimentales obtenues ci-dessus permettent de tirer un certain nombre de conclusions, dans le cas de cultures espacées et à interlignes non enherbés.

a) Pour les cultures annuelles cultivées avec des écartements assez importants (de l'ordre de 80 cm) il existe, en plus de la consommation en profondeur, une consommation latérale qui peut être plus ou moins importante suivant les sols considérés.

b) En ce qui concerne les cultures à enracinement permanent (exemple des vergers), le phénomène de consommation différentielle dans l'espace peut exister avec les grands écartements de plantation (plusieurs mètres). D'autre part, des hétérogénéités de divers ordres peuvent venir fausser les mesures : effet collecteur de l'eau par les frondaisons, tassement local ou systématique du sol, etc. Enfin, il apparaît que le gradient latéral de consommation provoqué par une zone à fort enracinement, a tendance à se maintenir et même à s'amplifier avec le temps.

c) En culture irriguée et dans le cas des plantes considérées, les apports d'eau d'irrigation, avec certains dispositifs classiques, risquent de ne pas pouvoir être modulés selon les gradients de consommation réellement existants. Pour une dose donnée, il peut y avoir par exemple défaut d'apport dans la ligne et excès dans l'interligne ; cela pourrait en partie expliquer certains phénomènes de lessivage déjà observés. Par ailleurs, les données obtenues mettent en évidence les difficultés d'établissement précis d'un bilan de consommation, sans analyse préalable des modalités de dessèchement latéral, en fonction de différents paramètres (cultures, écartements, enracinement, cycles d'humectation et de dessèchement, etc...). Enfin, cette étude montre qu'il est assez difficile, avec des couverts comme les vergers non enherbés, de bien évaluer les consommations d'eau, du fait de la non uniformité dans l'utilisation des réserves hydriques ; les inconvénients pourront cependant être moindres dans le cas de vergers enherbés par suite d'une consommation à peu près homogène partout.

Reçu pour publication en novembre 1969.

SUMMARY

METHODS OF DRAINING SOIL PLANTED WITH CROPS SOWN IN LINES

In crops planted at rather wide intervals, much experimental data demonstrate a differential consumption of water in the soil between the rows and the intervening spaces, a fact which very often hinders the establishment of a balance. In fact, for annual crops, there is a fairly wide lateral consumption as well as the consumption in depth due to rooting. This phenomenon is equally noticeable in perennial crops planted at wide intervals (e. g. ungrassed orchards).

It also transpires that the lateral consumption gradient caused by a zone of strong rooting tends to be maintained and even to increase in time ; this is demonstrated by the results obtained in an experiment carried out on one line of vegetation in soil protected from evaporation and infiltration. Consequently of the spot, calculation of the water needs of crops planted in lines requires the point of reference chosen to be very representative of the whole area studied. This

implies prior knowledge of the lateral drainage with reference to the different parameters connected with the crop and the land under consideration, so as to be able to decide on the most suitable type of plant and the best measuring point positions.

ZUSAMMENFASSUNG

MODALITATEN DER AUSTROCKNUNG DES BODENS UNTER IN REIHEN GEPFLANZTEN KULTUREN

An Hand zahlreicher Versuchsergebnisse wurde festgestellt, dass im Falle von Pflanzungen mit ziemlich breiten Reihenabständen, ein differentieller Verbrauch zwischen der Reihe und der Zwischenreihe auftritt, weshalb sehr oft die Aufstellung der Bilanzen gestört wird. In der Tat besteht für die jährlichen Kulturen, ausserhalb des Verbrauchs in Tiefenrichtung, der von der Wurzelbildung abhängig ist, ein mehr oder weniger beträchtlicher seitlicher Verbrauch. Dieses letzte Phänomen lässt sich auch bei Dauerkulturen mit breiten Abständen feststellen (Beispiel : die nicht mit Grass bewachsenen Obstgärten).

Es wurde ausserdem festgestellt, dass der seitliche Verbrauchsgradient, der durch eine Zone mit starker Wurzelbildung verursacht wird, die Tendenz hat, sich zu erhalten oder sich mit der Zeit selbst zu vergrössern, wie die Ergebnisse aus einem Versuch mittels einer Wachstumsreihe auf einem gegen Verdunstung und Versickerung geschützten Boden bewiesen haben. Infolgedessen verlangt die auf freiem Felde ausgeübte Bestimmung des Bedarfs an Wasser für Reihenkulturen, dass der gewählte Referenzpunkt eine gute Wiedergabe der untersuchten Gesamtkultur drastellt. Dies erfordert die vorherige Bestimmung der Modalitäten der seitlichen Austrocknung in Funktion der verschiedenen Parameter, die für die betrachtete Kultur und das Milieu charakteristisch sind. So wird es möglich, sich für den Pflanzungstypus oder für die Wahl der zweckmässigsten Messpunkte zu entscheiden.

Высыхание почвы под рядковыми насаждениями.

Ж. ПЮЭШ, К. МАЭРТЕНС, Ж. Р. МАРТИ.

РЕЗЮМЕ

Многочисленные экспериментальные данные указывают что в случаях насаждений с достаточно широким размещением, существует разница между потреблением влаги в рядах и в междурядьях, что сильно затрудняет составление балансов. Ибо в случаях однолетних культур, кроме глубинного потребления, которое зависит от окоренения, есть еще потребление боковое, более или менее крупных размеров. Это явление наблюдается также в случаях многолетних насаждений с широким размещением (например незадерненные сады).

С другой стороны ясно, что у градиента бокового потребления влаги формирующегося в зонах сильного окоренения, существует тенденция к сохранению на одном уровне, или даже к увеличению со временем; это доказывается результатами опыта насаждения в один ряд на почве защищенной от испарения и от инфильтрации. Значит, при полевых определениях влагопотребности рядковых насаждений, необходимо чтобы выбранный пункт референции был-бы показательным для всей изучаемой совокупности. Для этого необходимо предварительно изучить формы бококвого высыхания в зависимости от различных параметров связанных с возделыванием и с рассматриваемой средой; чтобы затем иметь возможность принять решение о типе посадки и о выборе пунктов наиболее подходящих для измерений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COURAU M., PUECH J., FIORAMONTI S., MAERTENS C., 1966. Observations sur la consommation de l'eau et la production du maïs en culture sèche et irriguée. *Bull. A. F. E. S.*, 44-59.

MAERTENS C., MORIZET J., STUDER R., 1965. Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons. *Ann. agron.*, **16**, 5-23.

MAERTENS C., FIORAMONTI S., COURAU M., PUECH J., 1966. Modalités d'utilisation de l'eau du sol par le maïs. Examen de la notion de réserve utilisable. *C. R. Acad. Agric.*, 1338-1348.

MORIZET J., 1967. Étude de la circulation de l'eau non saturante dans différentes terres, en régime de dessèchement. *Ann. agron.*, **18**, 267-283.

PUECH J., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols, vers une zone d'absorption. *Ann. agron.*, **20** (3), 245-261.

ROBELIN M., 1963. Action de la couverture du sol par un film de polyéthylène sur le comportement et l'évapotranspiration maximale d'une culture de maïs (46-49). (Rev. *Connaissance des plastiques*, 6e Colloque sur les applications des matières plastiques en Agriculture).

Ann. agron., 1969, **20** (6), 609-625.

PREMIERS RÉSULTATS D'UNE ENQUÊTE SUR LE SOUFRE TOTAL DES SOLS CULTIVÉS FRANÇAIS

Ginette SIMON-SYLVESTRE

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

Dans une enquête agronomique réalisée sur une centaine de sols cultivés français, le soufre total du sol a été l'objet d'une attention particulière et plusieurs recherches ont été entreprises à son sujet : influence de la nature du sol sur son taux, comparaison avec l'azote et le carbone des sols, et étude de son évolution vers des formes assimilables par les plantes.

INTRODUCTION

Le soufre, élément majeur indispensable à la croissance des végétaux, est présent dans toutes les terres, mais en quantité variant entre de larges limites, de 0,01 à 15 p. 1 000.

Depuis plusieurs années, quelques cas de carence en cet élément ont été signalés en France, ce qui conduit à penser qu'un « problème soufre » risque de se poser, à un moment donné, pour certains sols, dans certaines conditions. Il paraissait alors intéressant d'envisager une enquête agronomique sur l'ensemble des sols cultivés français, de diverses origines. La détermination du soufre total d'une centaine de sols, la mise en évidence d'une relation entre cet élément et le carbone et l'azote des sols, et l'étude de son comportement en ce qui concerne l'approvisionnement des cultures, ont été les principaux points examinés à la suite de cette prospection.

I. — MODE OPÉRATOIRE ET MÉTHODES UTILISÉES

Ce travail porte sur une centaine de sols, très divers, provenant généralement de régions de grande culture, quelquefois cependant de zones maraîchères, de vergers et même de vignes. Tous les échantillons ont été séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm.

Des méthodes d'analyses simples et courantes ont été utilisées pour cette étude :

— dosage de l'azote total suivant la méthode Kjeldahl en présence du mélange catalyseur $CuSO_4 + K_2SO_4$;

— dosage du carbone par la méthode de Schollenberger modifiée par ANNE (1945) (oxydation à chaud de la matière organique en milieu sulfurique par un excès de bichromate, puis titrage de l'excès de ce dernier avec du sel de Mohr en présence de diphénylamine sulfurique) ;

— dosage du soufre total : association de la méthode signalée par l'A. O. A. C. (1) et de celle de STEINBERGS (1955) (oxydation de la terre par du peroxyde de sodium, puis , après insolubilisation de la silice et élimination des hydroxydes métalliques, dosage des sulfates par turbidimétrie) ;

— dosage du soufre minéralisable : nous avons appliqué au soufre la technique préconisée par LEFÈVRE et DROUINEAU (1949) pour l'azote. Nous entendons par soufre minéral les sulfates extraits par agitation en présence de chlorure de calcium à 0,15 p. 100, selon un rapport $\frac{\text{terre}}{\text{solution}} = 1$ (WILLIAMS et STEINBERGS, 1959).

— Les analyses granulométriques ont été réalisées au Laboratoire d'Analyses des Sols d'Arras, suivant les techniques classiques.

II. — TENEUR DES SOLS CULTIVÉS FRANÇAIS EN SOUFRE TOTAL

Jusqu'à maintenant aucune étude systématique sur le soufre total des sols n'a été entreprise en France, les quelques chiffres connus proviennent de recherches anciennes (G. BERTRAND, 1927).

Les sols prospectés ont été classés en trois catégories arbitraires basées sur le pH et sur le taux de carbonate de calcium :

pH < 7,0	0 p. 100	$CaCO_3$	groupe I
pH ⩾ 7,0	< 5 p. 100	$CaCO_3$	groupe II
	⩾ 5 p. 100	$CaCO_3$	groupe III

Il est possible de décrire brièvement chacun de ces groupes et en particulier de donner un aperçu rapide de leur composition (2).

— *Le groupe I* comprend principalement des sols bruns acides reposant sur des schistes, granites et granulites et originaires de Bretagne et du Massif central. Il s'y ajoute quelques sols très sableux à tendance podzolique prélevés en Sologne, dans le Berry et dans l'Ile-de-France, un lehm d'Alsace, une terre rouge à châtaigniers du Poitou, des boulbènes de la région de Toulouse, deux molasses de la vallée du Rhône,

(1) A. O. A. C. : Association of Official Agricultural Chemists.

(2) Afin de ne pas surcharger l'article, les tableaux de chiffres donnant tous les résultats analytiques de ces sols n'ont pas été imprimés, toutefois ils restent à la disposition de toute personne qui serait intéressée.

des sols alluviaux (Vallées de l'Ariège et de la Loire) et deux sols maraîchers (Landes et Anjou).

— *La majorité du groupe II* est constituée de sols bruns neutres développés sur des argiles à silex (Beauce, Gâtine tourangelle, Région Nord de l'Aisne) sur des sables et argiles de Sologne. Les autres sols proviennent des vallées de la Garonne, de la Loire et du Fecht (sols alluviaux) et de la Limagne (terre noire). Trois sols maraîchers ainsi qu'un « Ried » d'Alsace, complètent ce groupe.

— *Le groupe III* contient essentiellement des rendzines blanches et grises de Champagne et de Champagne berrichonne reposant sur de la craie ou sur du calcaire lithographique, ainsi qu'une rendzine noire située sur du calcaire de Beauce. Il renferme également quelques sols bruns calcaires de Picardie, une terre noire de Limagne, un loess d'Alsace, des sols alluviaux récents calcaires (Vallées du Rhin et du Rhône) et une mollasse. Quelques-unes des rendzines champenoises sont des terres de défriche récente et sont par suite riches en matières organiques.

Les teneurs des sols français en soufre total varient entre d'assez larges limites, de 0,01 à 0,50 p. 1 000. A quelques exceptions près, facilement explicables, les sols les moins bien pourvus appartiennent aux 1er et 2e groupes, et les plus riches à la troisième catégorie, calcaire.

Parmi les sols pauvres des 1er et 2e groupes (de 0,05 à 0,10 p. 1 000 S total) se trouvent des sols à faible taux de matières organiques représentés essentiellement par des sols sableux: Reigny (Cher), Mézières-en-Brenne (Indre), Blois 1962 (Loir-et-Cher) Saint-Briac (Ille-et-Vilaine), Gambais (Seine-et-Oise), Mabire (Cher), Couddes (Loir-et-Cher), Goult (Vaucluse), Galluis (Seine-et-Oise), des sols alluviaux: Plaisance-sur-Touch (Haute Garonne), Tarabel 17 751 (Haute Garonne), des sols appauvris par les traitements subis (terre témoin des 42 parcelles (Versailles), sans culture et sans aucun apport depuis 40 ans). Exceptionnellement, certains sols assez bien pourvus en matières organiques ont des teneurs très faibles en soufre total ; les cultures y présentent même des symptômes de carence : Tremblay-le-Vicomte (Eure-et-Loir) Tarabel 17 750 (Haute-Garonne). Les taux de soufre total peuvent parfois s'abaisser en dessous de 0,05 p. 1 000 et atteindre des valeurs extrêmement basses : Lorris (Loiret) sur sables de Fontainebleau (70 p. 100 sables, 5,7 p. 1 000 C, 0,03 p. 1 000 S), et les sols d'alluvions caillouteuses de la vallée du Rhône :

Terre à pêchers (Drôme)	74 p. 100 sables,	4,7 p. 1 000 C,	0,020 p. 1 000 S
Béraud (Ardèche)	75 p. 100 sables,	7,6 p. 1 000 C,	0,030 p. 1 000 S
Saint-Genis-Laval (Rhône)	71 p. 100 sables,	6,9 p. 1 000 C,	0,015 p. 1 000 S

Inversement, les terres les plus riches en soufre total de ces deux groupes ont aussi un taux élevé de carbone : ce sont des sols humifères, enrichis naturellement : Illhaüsern (Haut-Rhin), Briec (Finistère) ou artificiellement : sols maraîchers : Ballainvilliers (Seine-et-Oise), Aucanville (Haute-Garonne). Les limons et les sols bruns occupent la partie moyenne de ces deux groupes avec des teneurs oscillant entre 0,10 et 0,25 p. 1 000.

— Le groupe calcaire comprend principalement des sols riches en soufre total (généralement de 0,30 à 0,40 p. 1 000) ; ce sont tous des rendzines ou des sols bruns calcaires originaires le plus souvent de la Champagne et de la Champagne berrichonne ; leur taux de carbone est également relativement important. Les quelques

exceptions de ce groupe sont constituées par des sols nettement plus pauvres en carbone : sols alluviaux calcaires : Geiswasser (Haut-Rhin), Fourques (Gard), limons calcaires : Pontarcher (Aisne), Allonville (Somme), Eguisheim (Haut-Rhin), un sol d'érosion : Mauguio (Hérault) et une mollasse : Bordeneuve (Haute-Garonne).

D'une façon générale, la classification des sols français au point de vue soufre total, s'établit comme suit :

— à la base, des sols sableux, les sols alluviaux, les sols squelettiques ;
— au sommet, des sols calcaires (rendzines, sols bruns), les sols humifères.
— et au milieu les sols bruns plus ou moins acides, calcaires ou non.

Des valeurs souvent voisines ont été citées par des chercheurs étrangers pour leurs sols respectifs (tabl. 1) :

TABLEAU I

Teneur de sols étrangers en soufre total

Auteur	Nature des sols et pays d'origine	Valeurs limites
WILLIAMS, 1958	Sols divers d'Australie	0,04-1,90 (sols calcaires)
WALKER, 1958	Sols de prairies, Nouvelle-Zélande	0,29-0,71
WILLIAMS, 1960	Sols non calcaires, Écosse	0,22-0,69
WILLIAMS, 1960	Sols calcaires	moyenne 0,99
SAALBACH, 1962	Sols divers d'Allemagne	0,16-0,46
NIKOLOV, 1964	Sols gris, tchernozems, Bulgarie	0,15-0,37
AIDINYAN, 1964	Sols bruns, podzols, tchernozems, Russie	0,15-0,58
DAVIDESCO, 1964	Sols bruns, podzols, tchernozems, Roumanie	0,16-0,44
GALOPPINI, 1964	Terrains alluviaux de Toscane (Italie)	0,07-0,56
GIOVANNINI, 1964	Sols de prairies (Sicile)	0,20-0,50
PALLOTTA, 1964	Sols alluviaux d'Émilie (Italie)	0,11-0,70

La connaissance de la teneur d'un sol en soufre total ne présente toutefois pas plus d'intérêt pour l'alimentation soufrée des plantes que le dosage d'azote total pour l'alimentation azotée. Il n'a pas en effet été trouvé de relation entre le soufre total d'un sol et l'absorption par les cultures (SAALBACH, 1962) et les résultats exposés à la fin de ce travail confirment d'ailleurs l'opinion de cet auteur.

III. — RELATION ENTRE LE SOUFRE, LE CARBONE ET L'AZOTE DES SOLS

Plusieurs chercheurs étrangers ont pressenti l'existence entre C, N et S d'un rapport approximativement constant pour un grand nombre de sols. Il est d'ailleurs logique qu'une relation existe entre ces trois éléments puisque, comme l'azote, le soufre existe en grande partie sous forme organique et que de plus, il évolue au cours du temps parallèlement à l'azote et au carbone (SIMON-SYLVESTRE, 1964). Nous nous sommes alors proposés de calculer cette relation pour les sols français. Pour les 103 sols

prospectés, dont 42 acides, 24 neutres et 37 alcalins, c'est-à-dire avec une répartition à peu près identique des terres acides et calcaires, nous arrivons à une relation générale de 105,6/10/1,04 [1] légèrement différente de celle trouvée par les auteurs étrangers pour leurs sols respectifs. Dès 1945, EVANS avait obtenu pour des sols podzoliques du Minnesota un rapport C/N/S de 135/10/1,13 et pour des tchernozems et des sols bruns de prairies 116/10/1,5. En Nouvelle-Zélande, WALKER (1958) a calculé un rapport de 120/10/1,3, également pour 22 sols de prairies. WILLIAMS (1958) a pu différencier les sols acides australiens (152/10/1,21) des sols alcalins (140/10/1,52), plus riches en soufre et plus pauvres en matières organiques. Plus récemment (1960), il a modifié le calcul de la relation pour les sols calcaires : en soustrayant du soufre total les sulfates combinés au carbonate de calcium, présents en quantité notable dans cette catégorie de sols et indépendants de la matière organique, il parvient à un rapport voisin de celui trouvé pour les sols acides. De son côté, HARWARD (1962) a signalé un rapport de 145/10/1,01 pour seize sols agricoles d'Oregon. Les sols étrangers que nous venons de citer, possèdent généralement un rapport C/N plus élevé que les sols français. Cette différence provient vraisemblablement du fait que l'agriculture est extensive sur ces grandes étendues américaines, australiennes et néozélandaises et que les sols y sont relativement moins riches en azote. Il nous a été possible de calculer les rapports pour les trois groupes de sols séparément et de retrouver la différenciation de WILLIAMS :

Groupe I : 110,30/10/0,87
Groupe II : 107,00/10/0,96
Groupe III : 99,50/10/1,32

En allant de l'acidité vers l'alcalinité, les teneurs en soufre deviennent plus importantes pour un taux de matières organiques plus faibles. Cela pourrait être dû à une matière organique plus riche en soufre ou à une quantité plus importante de soufre minéral.

Cette enquête permet de constater que la relation générale trouvée en France est voisine des chiffres théoriques avancés par WALKER qui pensait que le carbone, l'azote et le soufre étaient associés dans la matière organique en proportions définies comme 100, 10 et 1. Il est probable qu'avec une prospection encore plus importante, et en utilisant la modification apportée par WILLIAMS pour les sols calcaires, nous serions parvenus à un résultat meilleur.

Il est intéressant de remarquer que des sols cultivés de la même région qui reposent sur des roches mères identiques et qui ont par conséquent le même passé géologique dans les mêmes conditions climatiques, présentent beaucoup de similitudes entre eux quant à leur rapport C/N/S. Le tableau 2 en donne quelques exemples.

D'autre part, il faut également signaler que la nature de la roche mère pour les sols calcaires qui renferment une proportion relativement importante de soufre minéral, semble influencer leur teneur en soufre total. Ainsi, les rendzines de Champagne berrichonne reposant sur calcaire lithographique du Rauracien, sont moins riches que celles de Champagne sur craie du Sénonien (tabl. 3).

[1] Les chiffres indiqués dans cet article diffèrent très légèrement de ceux signalés dans le B. T. I. de juillet-août 1968. A l'époque, nos calculs avaient porté sur un plus petit nombre de sols (SIMON-SYLVESTRE, 1968).

TABLEAU 2

Influence de la roche mère sur le rapport C/N/S

Nature du sol et lieu de prélèvement	Roche-mère et région	C/N/S N = 10
Rendzines	*Calcaire lithographique du Rauracien*	
Châteauroux : Nivet (Indre)	Champagne berrichonne	105,7/10/1,06
Châteauroux : Paillault (Indre)		95/10/1,08
Châteauroux : Augé (Indre)		102,5/10/1,05
Lissay-Lochy, parc. 8 (Cher)		104,7/10/1,28
Lissay-Lochy, parc. 9 (Cher)		96,8/10/1,00
Châteauroux, Saint-Caprais (Indre)		90,7/10/1,03
Sols bruns acides	*Schiste*	
Langolen (Finistère)	Bretagne	117,3/10/0,52
Pleyben (Finistère)		119,9/10/0,48
Briec (2) (Finistère)		130,5/10/0,78
Kerfily (Finistère)		118,9/10/0,66
Sols bruns lessivés	*Argile à silex*	
Tremblay-le-Vicomte (Eure-et-Loir)	Beauce	144,7/10/0,63
Achères (Eure-et-Loir)		120,7/10/0,67
Lucé (Eure-et-Loir)		163,3/10/0,74 terre enrichie en matières organiques par le propriétaire
Saint-Cyr-du-Gault (Loir-et-Cher)		107,2/10/0,70
Sols alluvionnaires	*Molasse miocène*	
Terre à pêchers (Drôme)	Vallée du Rhône	102,8/10/0,50
Béraud (Ardèche)		106/10/0,46

TABLEAU 3

Influence de la roche mère sur la teneur des sols en S total

Lieu de prélèvement	Roche-mère et région	N/S N = 10
	Calcaire lithographique du Rauracien	
Châteauroux : Nivet (Indre)	Champagne berrichonne	10/1,06
Châteauroux : Paillault (Indre)		10/1,08
Châteauroux : Augé (Indre)		10/1,05
Lissay-Lochy, parc. 8 (Cher)		10/1,28
Lissay-Lochy, parc. 9 (Cher)		10/1,00
Châteauroux, Saint-Caprais (Indre)		10/1,03
	Craie du Sénonien	
Vatry (Marne)	Champagne	10/1,62
Châlons 1 (Marne)		10/1,46
Châlons 5 (Marne)		10/1,63
Châlons 1962 (Marne)		10/2,28
Baconnes (Marne)		10/1,20
Châlons 2 (Marne)		10/1,59
Châlons 8 (Marne)		10/1,54

L'analyse statistique fournit également un autre moyen d'études des relations existant entre le carbone, l'azote et le soufre des sols.

A. — *Analyse de variance entre groupes*

L'analyse de variance nous apprend que, dans notre classement arbitraire des sols par le pH et le CO_3Ca, les différences pour les teneurs en soufre sont hautement significatives au moins à 0,1 p. 100 entre certaines catégories de sols (groupes I et III et II et III).

TABLEAU 4

Teneurs moyennes en C, N et S de chaque groupe de sols et écarts-type des moyennes

	C °/oo		N °/oo		S °/oo	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Ensemble des groupes (102 sols)	18,06	0,97	1,75	0,09	0,187	0,009
Groupe I (41 sols)	15,86	1,43	1,44	0,12	0,125	0,013
Groupe II (24 sols).....	17,38	2,51	1,62	0,22	0,153	0,023
Groupe III (37 sols)	20,93	1,44	2,16	0,14	0,279	0,015

B. — *Régressions simples*

On s'attend à ce que le soufre soit en liaison avec le carbone et l'azote : les coefficients de corrélation, tous très hautement significatifs, en fournissent d'ailleurs le témoignage (tabl. 5).

TABLEAU 5

Coefficients de corrélation

	S par rapport à C	S par rapport à N	N par rapport à C
Groupe I.....	0,715***	0,699***	0,900***
Groupe II.....	0,823***	0,878***	0,950***
Groupe III.....	0,676***	0,743***	0,710***
Ensemble des sols .	0,740***	0,776***	0,860***

Seuil de signification NS = non significatif
* = 5 p. 100
** = 1 p. 100
*** = 0,1 p. 100.

Pour une catégorie donnée de sols, les écarts sont faibles entre le coefficient de corrélation du soufre par rapport à l'azote et celui du même élément par rapport au carbone. Il est vrai que l'azote et le carbone sont généralement étroitement liés

(tabl. 5). Le plus souvent la liaison du soufre avec l'azote paraît légèrement plus forte qu'avec le carbone, c'est pourquoi l'azote a été choisi comme première variable dans les calculs de régressions multiples.

C. — *Régressions multiples*

Le soufre est significativement lié à l'azote, que ce soit pour l'ensemble des sols ou pour chacun des groupes (tabl. 6, 7, 8 et 9). De plus, pour l'ensemble des sols, le carbone apporte comme seconde variable explicative, un supplément d'information significatif (tabl. 6).

Il a été vérifié par ailleurs que des régressions quadratiques n'apportaient pas une amélioration significative dans l'explication de la variation du soufre total dans les sols.

TABLEAU 6

Régression multiple pour l'ensemble des sols

	Degrés de liberté	Sommes carrés des écarts	F
Variation totale S .	99	0,8905	
Régression N	1	0,5370	148,8***
Régression C (1).....	1	0,0180	5,2*
Résidu	97	0,3355	

(1) Il s'agit de la différence entre la somme des carrés des écarts due à la régression (S/N, C) et celle due à la régression (S/N).

Équation des plans parallèles de régression correspondant à chacun des groupes :

$$\text{Groupe I} : S = -0{,}001 + 0{,}058\,N + 0{,}002\,68\,C$$
$$\text{Groupe II} : S = 0{,}013 + 0{,}058\,N + 0{,}002\,68\,C$$
$$\text{Groupe III} : S = 0{,}097 + 0{,}058\,N + 0{,}002\,68\,C$$

pour

$$S < 0{,}5 \text{ p. } 1\,000$$
$$N < 4 \text{ p. } 1\,000$$
$$C < 65 \text{ p. } 1\,000$$

Du fait des liaisons étroites existant entre C et N, il n'est pas possible de comparer les régressions de C et N sur les teneurs en soufre indépendamment l'une de l'autre.

Le carbone n'intervenant pas d'une manière significative pour les groupes I, II et III, nous avons tracé sur la figure 1, les droites de régression simple du soufre en fonction de l'azote pour chacun des groupes :

$$\text{Groupe I} : \quad S = 0{,}0114 + 0{,}0787\,N$$
$$\text{Groupe II} : \quad S = 0{,}0001 + 0{,}0948\,N$$
$$\text{Groupe III} : \quad S = 0{,}1102 + 0{,}0779\,N$$

TABLEAU 7

Régression multiple : groupe I

	Degrés de liberté	Sommes carrés des écarts	F
Variation totale S .	40	0,2836	
Régression N	1	0,1389	37,4***
Régression C (1).....	1	0,0102	9,2 NS
Résidu	38	0,1345	

(1) Il s'agit de la différence entre la somme des carrés des écarts due à la régression (S/N, C) et celle due à la régression (S/N).

TABLEAU 8

Régression multiple : groupe II

	Degrés de liberté	Sommes carrés des écarts	F
Variation totale S .	23	0,3062	
Régression N	1	0,2364	74,6***
Régression C (1).....	1	0,0011	0,35 NS
Résidu	21	0,0687	

(1) Il s'agit de la différence entre la somme des carrés des écarts due à la régression (S/N, C) et celle due à la régression (S/N).

TABLEAU 9

Régression multiple : groupe III

	Degrés de liberté	Sommes carrés des écarts	F
Variation totale S .	36	0,3006	
Régression N	1	0,1663	43,3***
Régression C (1).....	1	0,0130	3,6 NS
Résidu	34	0,1213	

(1) Il s'agit de la différence entre la somme des carrés des écarts due à la régression (S/N, C) et celle due à la régression (S/N).

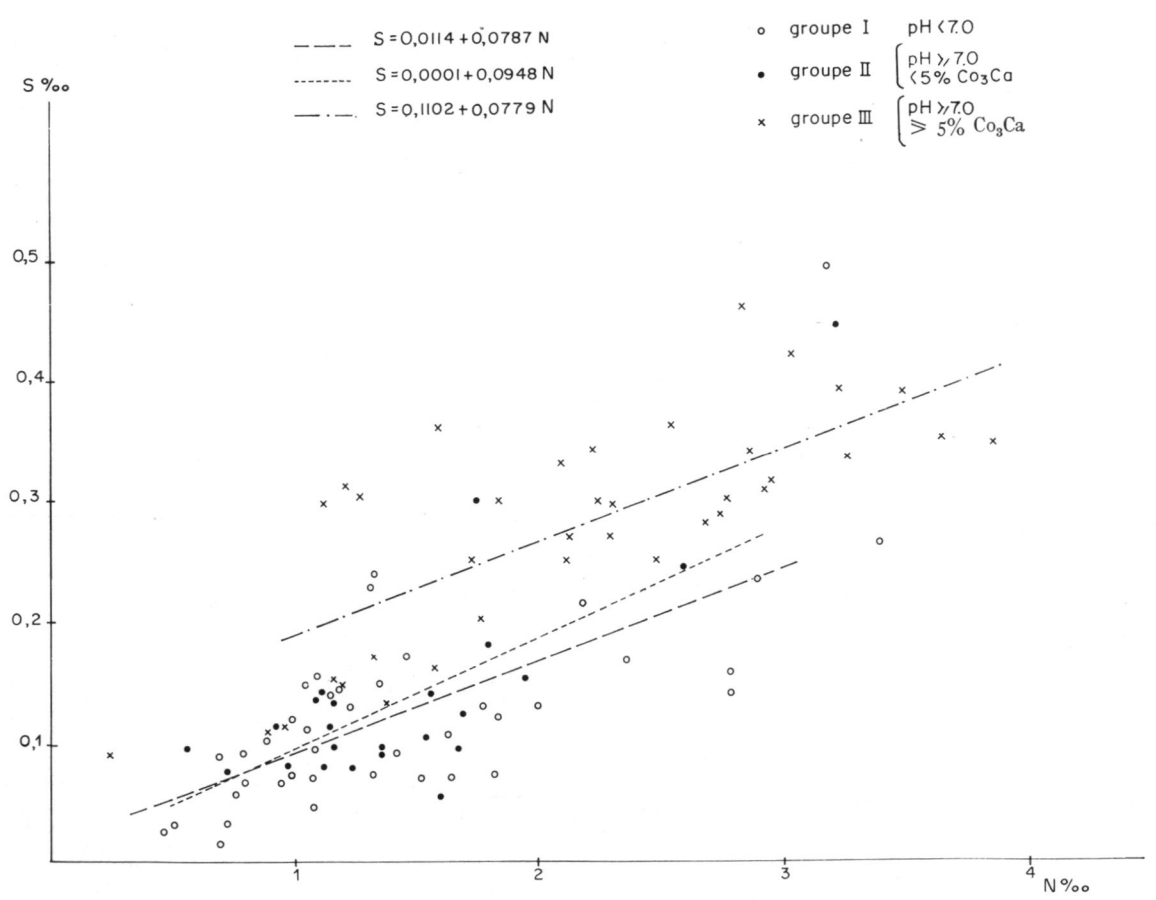


FIG. 1. — *Droites de régression simple du soufre en fonction de l'azote*

Il faut remarquer que les droites des groupes I et III sont pratiquement parallèles. La matière organique aurait une composition relativement constante et la différence entre les deux ordonnées à l'origine serait vraisemblablement due à la présence dans les sols calcaires d'un pourcentage plus important de soufre minéral (sans doute du sulfate de calcium). Par contre, la pente de la droite du groupe II diffère légèrement de celle des deux autres droites. Il se peut que la présence dans ce groupe de quelques sols maraîchers qui se placent sur le graphique très en dehors des autres, soient la cause de cette différence.

Un point intéressant apparaît à la suite de cette étude statistique : seul le taux de carbonate de calcium semble intervenir dans le classement des sols suivant leur teneur en soufre total. Les sols calcaires sont les plus riches et la différence avec les autres sols réside dans le fait que leur supplément de soufre n'est pas lié au carbone ni à l'azote mais est minéral, ce que nous ne savions pas en calculant simplement les rapports C/N/S. Il serait intéressant dans une étude ultérieure de déterminer ce soufre minéral afin de l'éliminer dans un nouveau calcul de régression.

IV. — COMPORTEMENT DU SOUFRE TOTAL D'UN SOL : SA MINÉRALISATION

La majeure partie du soufre total des sols (75 à 90 p. 100) se trouve sous forme de combinaisons organiques, non directement utilisables par les plantes. Outre la nature de la matière organique qui doit jouer un rôle important, il faut l'intervention de microorganismes divers, dans des conditions particulières de température, d'humidité et d'aération, pour provoquer la minéralisation progressive du soufre organique du sol et son passage sous des formes assimilables par les végétaux (sulfates). En conséquence, la connaissance de la teneur d'un sol en soufre total ne renseigne absolument pas sur son aptitude à subvenir aux besoins des cultures au cours du cycle végétatif, mais seulement sur l'importance de ses réserves. C'est pourquoi nous nous sommes proposés d'étudier *in vitro* cette minéralisation du soufre organique sur une cinquantaine de sols différents, provenant de l'étude précédente. Nous avons, pour cela, appliqué la méthode préconisée pour l'azote minéralisable par Lefèvre et Drouineau (1949) et décrite précédemment. Cette étude théorique de la minéralisation est réalisée dans des conditions optima, différentes des conditions naturelles. Néanmoins, elle nous permettra de différencier les terres entre elles.

Étant donné que les échantillons des divers sols ont été prélevés à des dates variables, la discussion des résultats portera sur les quantités totales de soufre minéral dosées après la minéralisation et non uniquement sur ce qui a été minéralisé *in vitro*. Plusieurs azotes minéralisables déterminés dans les mêmes conditions ont été ajoutés afin de permettre quelques comparaisons entre le soufre et l'azote. Les résultats obtenus sont consignés dans les trois tableaux 10, 11 et 12. Les sols y sont classés suivant leur richesse en soufre total :

en dessous de 0,10 p. 1 000
entre 0,10 et 0,20 p. 1 000
au-dessus de 0,20 p. 1 000

TABLEAU 10

Minéralisation du soufre et de l'azote des sols
(S total inférieur à 0,10 p. 1 000)

Terres	S total (‰)	S minéral après 28 jours à 28° (p.p.m.)	Après 28 jours à 28°	
			S minéral (% S total)	N minéral (% N total)
Achères (Eure-et-Loir)	0,103	34,00	33,00	6,50
Saint-Cyr-du-Gault (Loir-et-Cher)	0,078	14,30	18,30	
Aspach (Lehm) (Haut-Rhin)	0,093	16,80	18,05	7,55
Issoudun (Indre)	0,056	16,10	28,75	
La Minière (Seine-et-Oise)	0,085	13,25	15,60	
Reigny 1 (Cher)	0,065	7,25	11,15	
Tremblay (Eure-et-Loir)	0,078	19,50	25,00	7,20
Saint-Briac (Ille-et-Vilaine)	0,072	12,25	17,00	
Condat (Puy-de-Dôme)	0,109	9,25	8,50	6,50
Joze (Puy-de-Dôme)	0,096	11,75	12,25	
Mézières-en-Brenne (Indre)	0,056	9,25	16,50	
Témoin (42 parc.) Versailles, Seine-et-Oise	0,071	13,25	18,65	
Gambais (Seine-et-Oise)	0,090	2,25	2,50	

TABLEAU 11

Minéralisation du soufre et de l'azote des sols
(S total entre 0,10 et 0,20 p. 1 000)

Terres	S total (‰)	S minéral après 28 jours à 28° (p.p.m.)	Après 28 jours à 28°	
			S minéral (% S total)	N minéral (% N total)
Lucé (Eure-et-Loir)	0,125	22,80	18,25	5,70
Chartres (Eure-et-Loir)	0,180	36,00	20,00	
Crucheray (Loir-et-Cher)	0,165	14,30	8,65	
Wintzenheim-Turckheim (Haut-Rhin)	0,150	34,10	22,70	4,05
Barenton (Aisne)	0,137	19,60	14,30	
Crémery (Somme)	0,135	27,00	20,00	
Eguisheim (lœss) (Haut-Rhin)	0,153	16,00	10,45	3,25
La Pierre-qui-Vire (Yonne)	0,133	4,00	3,00	
Geiswasser (Haut-Rhin)	0,150	18,00	12,00	
Oresmaux (Somme)	0,142	36,00	25,35	
Pleyben (Finistère)	0,140	4,00	2,85	
Langolen (Finistère)	0,152	18,25	12,00	2,60
Nantes (Loire-Atlantique)	0,128	10,75	8,40	4,45
Saint-Amand (Puy-de-Dôme)	0,171	5,75	3,35	6,46
Brie-sous-Archaic (Charente)	0,160	43,25	27,05	5,80
Pontarcher (Aisne)	0,171	34,50	20,15	
Boussingault (Seine-et-Marne)	0,115	20,10	17,50	
Mauguio (Hérault)	0,112	20,00	17,85	
Saint-Laurent (Landes) (vieille métairie)	0,112	10,50	9,35	

Plusieurs observations peuvent être faites à partir des tableaux précédents :

— Le taux de minéralisation du soufre, très variable, est beaucoup plus élevé que celui de l'azote à trois exceptions près : alors que ce dernier dépasse rarement 7 p. 100, celui du soufre atteint fréquemment 15, 20 et même 33 p. 100 (tabl. 10). Il est donc confirmé que dans un grand nombre de cas, le soufre se minéralise plus intensément que l'azote lorsque les conditions sont favorables à la minéralisation : nous trouvons là un contrôle de nos observations faites antérieurement sur des sols en place (SIMON-SYLVESTRE, 1965).

TABLEAU 12

Minéralisation du soufre et de l'azote des sols
(S total supérieur à 0,20 p. 1 000)

Terres	S total (‰)	S minéral après 28 jours à 28° (p.p.m.)	Après 28 jours à 28°	
			S minéral (% S total)	N minéral (% N total)
Poiseul (Côte-d'Or)	0,245	11,50	4,70	
Mon-Désir (Puy-de-Dôme)	0,253	20,50	8,10	2,90
Petits-Closeaux (Seine-et-Oise)	0,300	27,25	9,10	
Ergué-Gabéric (Finistère)	0,215	16,00	7,45	4,80
Saint-Yvoine (Puy-de-Dôme)	0,315	10,50	3,30	4,07
Châlons-sur-Marne (1962) (Marne)	0,365	10,75	2,95	
Fontsalive (Puy-de-Dôme)	0,512	2,50	0,45	3,85
Vatry (Marne)	0,460	78,25	17,00	4,70
Amiens (Somme)	0,360	44,50	12,35	6,70
Baconnes (Marne)	0,390	7,00	1,80	
Châlons 1 (Marne)	0,253	0	0	
Châlons 8 (Marne)	0,343	3,00	0,90	
Châteauroux (Nivet) (Indre)	0,315	12,50	3,95	
Châteauroux (Paillault) (Indre)	0,300	10,50	3,50	
Les Ribottières (Eure-et-Loir)	0,237	24,25	10,25	
Briec (1) (Finistère)	0,490	21,00	4,30	

— Certaines terres très pauvres en soufre total et en matières organiques ont un taux de minéralisation très faible (tabl. 10).

Ex. : Gambais (Seine-et-Oise), terre très sableuse (70 p. 100 sables fins) et 7,38 p. 1 000 carbone.

Chez d'autres sols, de la même catégorie, bien que le pourcentage de minéralisation paraisse élevé, la quantité de soufre minéralisé n'y excède pas 10 p.p.m. du fait de leur pauvreté en soufre total :

Reigny (Cher) : limon sableux (67 p. 100 sables)
Condat (Puy-de-Dôme) : sol sableux acide sur granite (66 p. 100 sables)
Mézières-en-Brenne (Indre) : sol très sableux (89 p. 100 sables), pauvre en carbone.

Les terres de ce tableau présentant la minéralisation la meilleure, appartiennent à la catégorie limono-argileuse : leurs teneurs en soufre minéralisé avoisinent alors souvent 20 p.p.m. :

Achères (jusqu'à 34 p.p.m.) (Eure-et-Loir),
Aspach (lehm) (Haut-Rhin),
Issoudun (Indre),
Tremblay (Eure-et-Loir).

— Dans la série moyenne (tabl. 11), la minéralisation du soufre est peu importante chez certaines terres acides reposant sur granite : La Pierre-qui-Vire (Yonne), Saint-Amand (Puy-de-Dôme), ou sur schiste : Pleyben (Finistère). Le taux de minéralisation, par contre, est très élevé pour les sols limoneux: Mauguio (Hérault), Boussingault (Seine-et-Marne), Crémery (Somme), limono-argileux : Lucé (Eure-et-Loir), Chartres (Eure-et-Loir), limono-sableux : Wintzenheim-Turckheim (Haut-Rhin), Oresmaux (Somme) et argilo-calcaires : Pontarcher (Aisne), Brie-sous-Archaic (Charente).

— La dernière catégorie de sols, comprenant les terres les plus riches en soufre total, présente les taux de minéralisation les plus faibles, rarement supérieurs à 10 p. 100 ; les teneurs en soufre minéralisé y sont parfois élevées du fait de la richesse de ces sols en soufre total. Les taux de minéralisation les plus bas, parfois nuls, sont trouvés dans des rendzines : Saint-Yvoine (Puy-de-Dôme), terres de Châlons (Marne), Baconnes (Marne), Châteauroux (Indre) et dans des terres acides : Fontsalive (Puy-de-Dôme), Briec (Finistère). Quelques terres argilo-calcaires se comportent différemment : Petits-Closeaux (Seine-et-Oise), Vatry (Marne), Amiens (Somme), Les Ribottières (Eure-et-Loir).

Ces quelques résultats peuvent faciliter le choix des terrains où l'expérimentation des engrais sulfatés risque d'avoir le plus de chance de fournir un résultat positif à brève échéance, à savoir là où la minéralisation du soufre est généralement faible pour différentes raisons : absence de matières organiques (terres très sableuses), pH faible (sols acides), matières organiques enrobées par le calcaire (rendzines)... Ils peuvent également expliquer les quelques carences en soufre observées en France généralement sur des sols de rendzines où la minéralisation du soufre est très réduite, parfois même inexistante et où la faible épaisseur du sol limite l'exploration par les racines. Ces conditions défavorables se trouvent accentuées dans des régions éloignées de la mer et peu industrialisées par suite de l'insuffisance des apports de soufre par les précipitations.

CONCLUSIONS

Des conclusions partielles ont été énoncées pour chacune des trois parties de ce mémoire, que ce soit pour le soufre total lui-même, pour sa relation avec le carbone et l'azote ou pour son évolution biologique. Néanmoins quelques résultats méritent une attention particulière.

Le soufre total du sol comprend essentiellement deux fractions, l'une minérale souvent importante dans les sols calcaires, l'autre organique, soumise comme l'azote aux processus de minéralisation. Cette dernière fraction semble présenter une composition relativement stable, quel que soit le type de matière organique, le rapport S/N variant peu.

Il faut également insister sur un point pratique important. Une teneur élevée du sol en soufre total ne signifie pas nécessairement un bon approvisionnement des cultures en soufre. Nous avons pu mettre en évidence, que même dans des conditions exceptionnelles de température et d'humidité qui auraient tendance plutôt à surestimer les résultats, la minéralisation est mauvaise, parfois même nulle dans des

rendzines et dans des sols acides. Si l'agriculteur n'en tient pas compte, les cultures exigeantes en soufre et à croissance rapide en souffriront. De même, des sols sableux pauvres en matières organiques, donc pauvres en soufre total, contiennent peu de soufre minéralisable et se comportent vis-à-vis des cultures comme les rendzines précédentes. Par contre, les terres limono-argileuses, en général moyennement pourvues en soufre total, sont les mieux approvisionnées en soufre minéral. Nous connaissons un exemple précis pour illustrer ce fait : des parcelles témoin, sans cultures et sans aucun apport minéral ni organique depuis 20 ans, situées sur un limon des plateaux, fournissent encore une cinquantaine de kilogrammes de soufre minéral à l'hectare à l'époque où la minéralisation du soufre organique est maximum, malgré une teneur relativement faible en soufre total (0,09 p. 1 000) (SIMON-SYLVESTRE, 1969).

Reçu pour publication en octobre 1969.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier ici toutes les Stations d'Agronomie ainsi que les Centres d'Études Techniques Agricoles qui nous ont envoyé en même temps que les différents échantillons, de nombreux renseignements sur ces divers sols.

L'étude statistique des résultats a pu être entreprise grâce à la collaboration du Service de Biométrie de Versailles.

Nos remerciements s'adressent à la fois à ce service pour tous les calculs statistiques et à nos deux collègues, M. GRAS, de la Station centrale d'Agronomie et M. RÉMY de la Station d'Agronomie de Laon, pour les précieux conseils qu'ils nous ont donnés pour l'interprétation des résultats de cette analyse statistique.

SUMMARY

FIRST RESULTS OF AN INVESTIGATION INTO THE TOTAL SULPHUR CONTENT OF THE CULTIVATED SOILS OF FRANCE

The agronomic investigation of some hundred cultivated soils of very diverse French origin has enabled us to show the importance of several factors in regard to the total sulphur content of the soils (physical type, presence of lime or organic matter).

It has also been possible for us to establish a connection between this element and the carbon and nitrogen in these soils, and to observe that soils of the same geological origin have certain similarities regarding their C/N/S ratio. Organic sulphur appears to remain in a fairly constant proportion to organic nitrogen.

The amount of total sulphur in a soil does not usually affect the evolution of that sulphur into forms assimilable by vegetation. The best mineralisation of total sulphur seems to take place in alluvial clay soils often only moderately supplied with total sulphur

ZUSAMMENFASSUNG

ERSTE ERGEBNISSE EINER UMFRAGE UBER DEN GESAMTSCHWEFEL DER FRANZÖSISCHEN ACKERBÖDEN

Eine Landwirtschaftskundliche Umfrage über etwa hundert französische Ackerböden, sehr verschiedener Herkunft, hat es uns gestattet die Wichtigkeit mehrerer Faktoren, den Gesamtgehalt an Schwefel betreffend, herauszustellen (physische Natur, Gegenwart von Kalkstein, von organischen Substanzen).

Wir konnten ebenfalls eine Beziehung zwischen diesem Element und dem Kohlenstoff und Stickstoff der Böden aufstellen und feststellen, dass Böden gleicher geologischer Herkunft inbezug auf das Verhältnis C/N/S untereinander einige Ähnlichkeiten aufweisen. Der organische Schwefel scheint in einem ziemlich konstanten Verhältnis mit dem organischen Stickstoff zu bleiben.

Die Ergiebigkeit eines Bodens an Gesamtschwefel beeinflusst im allgemeinen die Evolution dieses Schwefels zu von Pflanzen assimilierbaren Formen nicht. Die beste Mineralisierung des Gesamtschwefels scheint sich in den schlammig-tonigen Böden, mit oft nur mittlerem Schwefelgehalt, zu vollziehen.

РЕЗЮМЕ

Первые результаты анкеты о суммарном содержании серы в окультуренных почвах Франции.

ЖИНЕТТА СИМОН-СИЛЬВЕСТР

Агрономическая анкета по поводу сотни окультуренных почв Франции, различного происхождения, позволила выявить силу влияния различных факторов на общее содержание серы в этих почвах (физическая природа, наличие кальция и органического вещества).

Оказалось также возможным установить соотношение между этим элементом и почвенными углеродом и азотом, и отметить что в почвах одного и того-же геологического происхождения существует некоторая однородность соотношения C/N/S. Соотношение органической серы и органического азота представляет величину как-будто постоянную.

Содержание общей серы в почве обычно не влияет на эволюцию этого элемента в направлении форм доступных для растений. Лучшая минерализация серы отмечается в почвах суглинисто-глинистых, часто очень посредственно снабженных этим элементом.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIDINYAN R. Kh., 1964. Content and forms of sulphur compounds in the different soils of the U. S. S. R. and its role in the transaction of matter between soil and plant. *5e Symp. internation. Agrochimica,* Palerme, 353-372.

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, 161-172.

BERTRAND G., SILBERSTEIN L., 1927. Recherches sur la teneur en soufre total de quelques sols cultivés. *Ann. agron.*, 274-276.

DAVIDESCO D., PAVLOVSKI G., 1964. Considérations sur la teneur en soufre des sols de la République populaire roumaine. *5e Symp. internation. Agrochimica,* Palerme, 430-434

DROUINEAU G., LEFÈVRE G., 1949. Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. agron.*, 518-536.

EVANS C. A., ROST C. O., 1945. Total organic sulfur and humus sulfur of Minnesota soils. *Soil Sci.*, **59**, 125-137.

GALOPPINI C., 1964. Lo zolfo nei depositi alluvionali della Toscana e la sua distribuzione in alcuni terreni tipici. *5e Symp. internation. Agrochimica,* Palerme, 225-233.

GIOVANNINI E., 1964. Le varie forme dello zolfo e loro evoluzione in alcuni terreni tipici della piana di Catania. *5e Symp. internation. Agrochimica,* Palerme, 170-179.

HARWARD M. E., TJUN TIEN CHAO, FANG S. G., 1962. The sulfur status and sulfur supplying power of Oregon soils. *Agron. J.*, **54**, 101-106.

NIKOLOV N., 1964. Total sulphur content of the basic soil types of *Bulgaria. Rozteniev Nauki,* **1**, 12, 23-30.

PALLOTTA U., SANDRI G., ROSSI N. Lo zolfo nei terrini dell'Emilia. *5e Symposium internation. Agrochimica,* Palerme, 276-290.

SAALBACH E., KESSEN G., JODEL G. K. Untersuchungen über die Bestimmung des Gehaltes an pflanzenverfügbarem Schwefel im Boden. *Landw. Forsch.*, **15**, 6-15.

SIMON-SYLVESTRE G., 1964. Évolution comparée du soufre, de l'azote et du carbone pendant 30 ans dans un sol maintenu sans végétation. *5e Symposium internation. Agrochimica*, Palerme. 163-169

SIMON-SYLVESTRE G., 1965. Évolution annuelle du soufre dans le sol comparée à celle de l'azote. *C. R. Acad. Agric.*, 426-431.

SIMON-SYLVESTRE G., 1968. Le Soufre. *B. T. I.*, **231**, 573-578.

SIMON-SYLVESTRE G., 1969. Les sulfates solubles du sol. *Ann. agron.*, **4**, 435-447.

STEINBERGS A., 1955. A method for the determination of total sulphur in soils. *Analyst*, **80**, 457-461.

WALKER T. W., ADAMS A. F. R., 1958. Studies on soil organic matter. Influence of phosphorus content of parent materials on accumulation of carbon, nitrogen, sulfur and organic phosphorus in grass-land soils. *Soil Sci.*, **85**, 307-318.

WILLIAMS C. H., STEINBERGS A., 1958. Sulphur and phosphorus in some eastern Australian soils. *Austral. J. agric. Res.*, **9**, 483-491.

WILLIAMS C. H., STEINBERGS, 1959. Soil sulphur fractions as chemical indices of available sulphur in some Australian soils. *Austral. J. agric. Res.*, **10**, 340-352.

WILLIAMS C. H., WILLIAMS E. G., SCOTT N. M., 1960. Carbon, nitrogen sulphur and phosphorus in some Scottish soils. *J. Soil Sci.*, **11**, 334-346.

Ann. agron., 1969, **20** (6), 627-638.

OBSERVATIONS SUR LES VARIATIONS SIMULTANÉES DES TENEURS EN EAU ET EN AZOTE MINÉRAL D'UN SOL

G. LEFÈVRE

Station d'Agronomie, 80 - Amiens
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

La mesure périodique des quantités d'azote minéral et d'eau se trouvant dans un sol, permet de suivre l'évolution de leur rapport. La concentration de la solution du sol en azote minéral, ainsi mesurée, présente une amplitude de variations plus importante que celle des deux constituants du rapport.

La signification de ces variations doit être recherchée dans les circonstances qui président à leur manifestation et dans leur influence sur les phénomènes (absorption radiculaire, migrations, minéralisation et réorganisation) qui peuvent en résulter.

INTRODUCTION

Les relevés périodiques des quantités d'azote minéral présentes dans un sol en place sont destinés, soit à connaître la répartition chronologique de l'azote mis à la disposition des cultures, soit à calculer un taux de minéralisation de l'azote organique.

Pour cela, la quantité globale d'azote minéral d'un profil est obtenue en additionnant les quantités trouvées dans divers niveaux; il semble nécessaire de considérer la signification que l'on doit attribuer à cette donnée, en fonction de la profondeur utilisée pour les mesures.

En effet, l'azote minéral trouvé à un niveau donné (n) résulte tout d'abord d'un bilan entre la réorganisation dont il peut être l'objet et la minéralisation de l'azote organique de l'horizon considéré. Il est ensuite soumis aux migrations liées au mouvement de l'eau dans le sol. Il peut ainsi provenir des niveaux voisins ($n - 1$ et $n + 1$) ou les alimenter. Enfin, dans les sols cultivés, il peut être prélevé, de façon variable avec le niveau envisagé, par les racines des végétaux.

De plus, cet azote minéral se trouve solubilisé dans l'eau du sol, et une quantité

d'azote, apparemment constante lorsqu'elle est exprimée par rapport à un volume donné de sol, peut se trouver dans la solution du sol à des concentrations très variables suivant l'état hydrique du volume considéré.

Si l'on considère que l'absorption radiculaire, la migration due aux mouvements de l'eau, les phénomènes de diffusion et même ceux de minéralisation et de réorganisation peuvent être influencés par cette concentration de la solution du sol en azote minéral, on peut se rendre compte de l'imprécision des renseignements fournis par la mesure globale de l'azote minéral rapporté à l'hectare.

Les communications entre les niveaux du sol augmentent encore la complexité du renseignement, lorsque, dans un but de précision, on augmente le volume de sol considéré (sa profondeur).

Ainsi, cette mesure globale ne peut que très imparfaitement répondre aux objectifs envisagés en commençant, c'est-à-dire constituer un bilan de minéralisation ou en évaluer l'efficacité.

Il nous a semblé que la notion de concentration $\left(\frac{\text{quantité d'azote minéral}}{\text{quantité d'eau}}\right)$ accompagnée de la valeur absolue des constituants du rapport serait plus apte :

— à caractériser le milieu ambiant. La quantité d'eau trouvée dans un profil de « porosités » connues permet d'avoir un aperçu de son aération, des possibilités de percolation, etc. ;

— à préciser les conditions d'alimentation de la plante. Les milieux de culture, par exemple, sont caractérisés par leur concentration en éléments nutritifs ;

— à relier éventuellement les données obtenues à des phénomènes d'équilibre de minéralisation étudiés séparément en laboratoire.

Ce mémoire présente d'abord les résultats d'une observation de trois années sur l'évolution séparée des quantités d'azote et d'eau contenues dans un profil de sol en place. Ces données sont ensuite reprises pour considérer les ordres de grandeur et les variations de la concentration qu'elles déterminent ; la signification que l'on pourrait leur attribuer est ébauchée.

DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les données expérimentales ont été obtenues sur un sol des environs d'Amiens, au cours de l'enquête générale menée par la Station agronomique de Laon.

L'effet d'un apport d'engrais sur le rythme de minéralisation de ce sol a fait l'objet d'un mémoire antérieur (LEFÈVRE *et al.*, 1965).

Nous ne considérerons ici que des parcelles sans culture et sans engrais.

Le sol renferme 30 à 50 p. 100 de calcaire et repose à 60 cm sur la roche mère crayeuse.

Le profil a été prélevé de 15 en 15 cm et les horizons ont les teneurs suivantes en N total :

	(‰)	Densité apparente
	—	—
0-15 cm	2,32	1,32
15-30 cm	2,01	1,32
30-45 cm	1,01	1,38
45-60 cm	0,47	1,38

Les prélèvements, effectués tous les quinze jours, ont été analysés à l'état frais, par extraction dans le chlorure de calcium normal et neutre. L'humidité a été déterminée sur une partie aliquote par séchage à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant.

La concentration est calculée à partir des quantités d'azote minéral et d'eau trouvées dans le même échantillon. On pourrait discuter sur le degré de participation de la totalité de l'eau ainsi mesurée dans la formation de la solution du sol, mais cette première approximation correspond à un calcul simple.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

L'étude de mesures bimensuelles sur quatre niveaux, pendant trois ans, conduit à rassembler un grand nombre de données. Nous les avons condensées dans des graphiques pour faciliter leur comparaison et leur interprétation.

Une série de graphiques (fig. 1) traduit l'évolution générale, au cours des trois ans et par niveau de 15 cm, des deux données de base (azote et eau exprimés en kg ou t/ha) et de leur rapport (concentration exprimée en mg/litre).

Il est bien évident que la concentration peut s'élever par augmentation de la richesse en azote et/ou par diminution de la teneur en eau et vice versa.

Pour rendre compte de l'importance relative de la valeur des membres du rapport, de petits graphiques notent, en abscisse, les teneurs en eau et, en ordonnée, les quantités d'azote rapportées à l'ha (fig. 2).

Dans ces graphiques, les points de même concentration sont situés sur des droites issues de l'origine. La concentration est déterminée par la pente de ces droites.

On peut ainsi noter facilement les variations de concentration accompagnant une valeur déterminée d'azote ou d'eau.

Remarques sur les quantités d'azote minéral mesurées dans les divers niveaux du profil

Le rythme d'accumulation de l'azote minéral est représenté, d'une façon classique, dans la figure 1. Les valeurs obtenues par un dosage effectué sur un poids déterminé de sol ont été converties par calcul en kg/ha.

Pour comparer le comportement des divers niveaux et estimer leur degré relati de participation dans l'accumulation totale de l'azote minéral dans le profil, les données précédentes ont été séparées en classes de 10 kg/ha et repérées par leur fréquence de présence au cours d'une année (tabl. 1).

Ce tableau permet les remarques suivantes :

1° les quantités d'azote minéral trouvées dans une épaisseur de 15 cm n'ont dépassé 50 kg/ha que deux fois, en 1964. Le maximum a été compris entre 40 et 50 kg en 1965 et a été inférieur à 40 kg en 1966 ;

2° la quantité annuelle « moyenne », trouvée dans un niveau, n'est pas caractéristique de ce niveau et est indépendante de sa richesse en azote total. Ainsi, en 1964, le niveau 0-15 dosant 2,32 p. 1 000 d'N total a une moyenne de 26 kg, alors que le niveau 45-60 dosant 0,47 p. 1 000 d'N total a une moyenne de 28,7 kg ;

3° la moyenne du profil entier (0-60 cm) varie dans de grandes limites, suivant les années : 113 kg en 1964, 73 en 1965, 59 en 1966.

Ces remarques illustrent les difficultés que rencontre l'utilisation de données statistiques résultant de la superposition de plusieurs phénomènes évoluant dans le temps.

Si l'on peut évaluer la quantité maximum d'azote minéral accumulé dans un

profil, il est extrêmement difficile, même en mesurant les exportations et les pertes par lessivage, de calculer un coefficient de minéralisation de l'azote organique du même profil.

TABLEAU I

Nombre de prélèvements ayant, par horizon et par année, une quantité donnée d'azote minéral

quantités d'azote kg/ha	1964	1965	1966		
Horizon 0-15					
< 10 kg/ha	1	2	2	5	
10-20	8	13	15	36	
20-30	5	6	4	15	N total :
30-40	6	2	0	8	2,32 ‰
40-50	2	1	0	3	
> 50 kg/ha	2	0	0	2	
Moyenne annuelle en kg/ha	*26,0*	*19,4*	*13,7*		
Horizon 15-30					
< 10 kg/ha	0	3	1	4	
10-20	5	10	15	30	N total :
20-30	6	8	5	19	2,01 ‰
30-40	8	3	0	11	
40-50	4	0	0	4	
> 50 kg/ha	1	0	0	1	
Moyenne annuelle en kg/ha	*29,9*	*19,6*	*15,8*		
Horizon 30-45					
< 10 kg/ha	1	6	3	10	
10-20	3	10	11	24	
20-30	10	7	6	23	N total :
30-40	5	1	1	7	1,01 ‰
40-50	4	0	0	4	
> 50 kg/ha	1	0	0	1	
Moyenne annuelle en kg/ha	*28,8*	*16,2*	*15,2*		
Horizon 45-60					
< 10 kg/ha	0	5	3	8	
10-20	4	10	10	24	N total :
20-30	7	6	8	21	0,47 ‰
30-40	12	3	0	15	
40-50	0	0	0	0	
> 50 kg/ha	1	0	0	1	
Moyenne annuelle en kg/ha	*28,7*	*17,5*	*14,6*		
Moyenne annuelle du profil 0-60	*113,4*	*72,7*	*59,3*		

L'exemple fourni par nos mesures montre également que les niveaux profonds peuvent contenir autant d'azote minéral que les niveaux superficiels. Ces richesses des niveaux inférieurs expliquent la fertilité des sols profonds qui maintiennent l'azote minéral à la disposition des végétaux, avant qu'il ne soit perdu dans les eaux de lessivage.

Mais l'origine de cet azote ne pourrait être connue qu'en marquant l'azote organique par niveau.

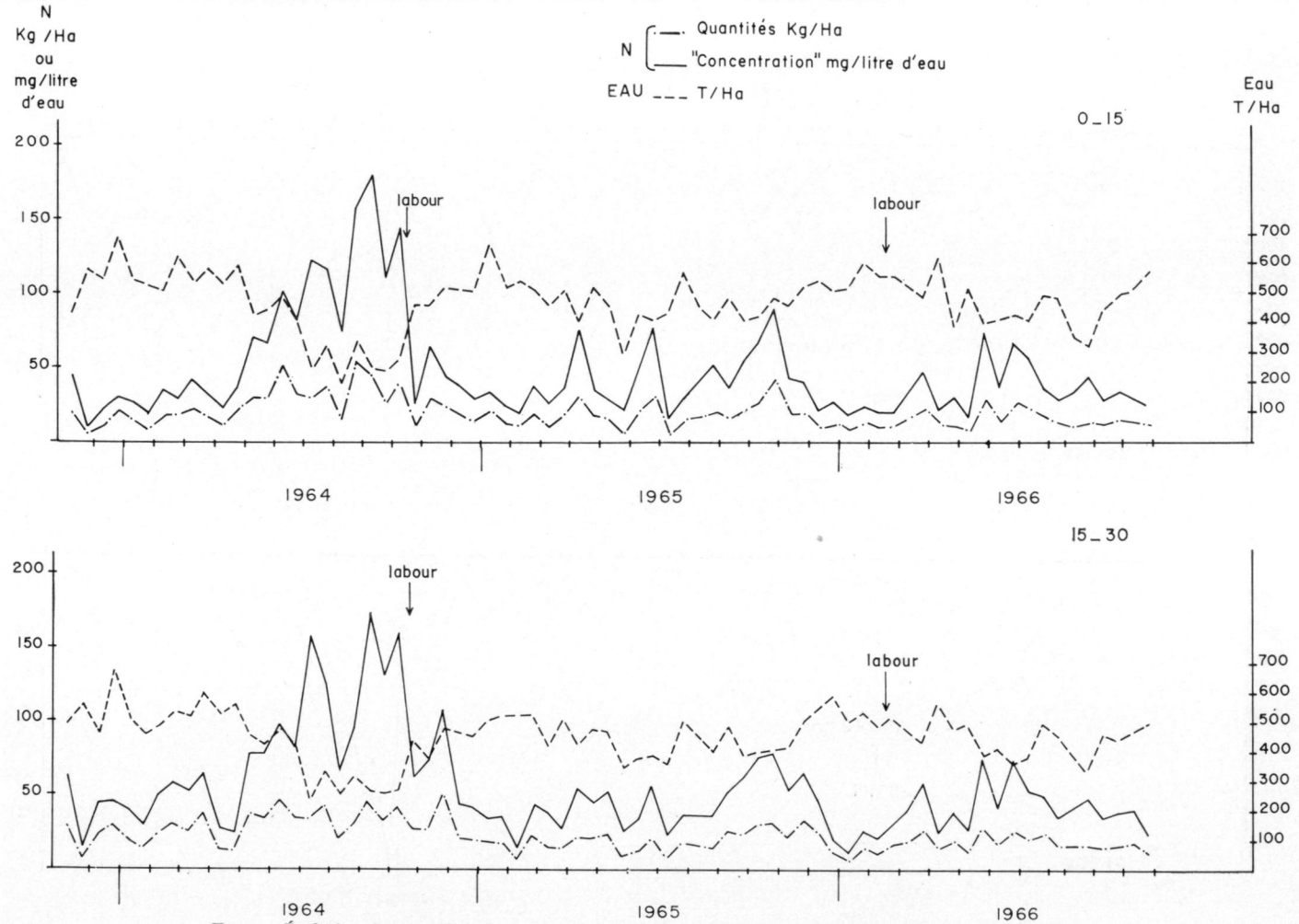


FIG. 1. *Évolution des quantités d'azote minéral et d'eau contenues dans des horizons de 15 cm d'épaisseur. Variations de la concentration en azote minéral de la solution du sol.*

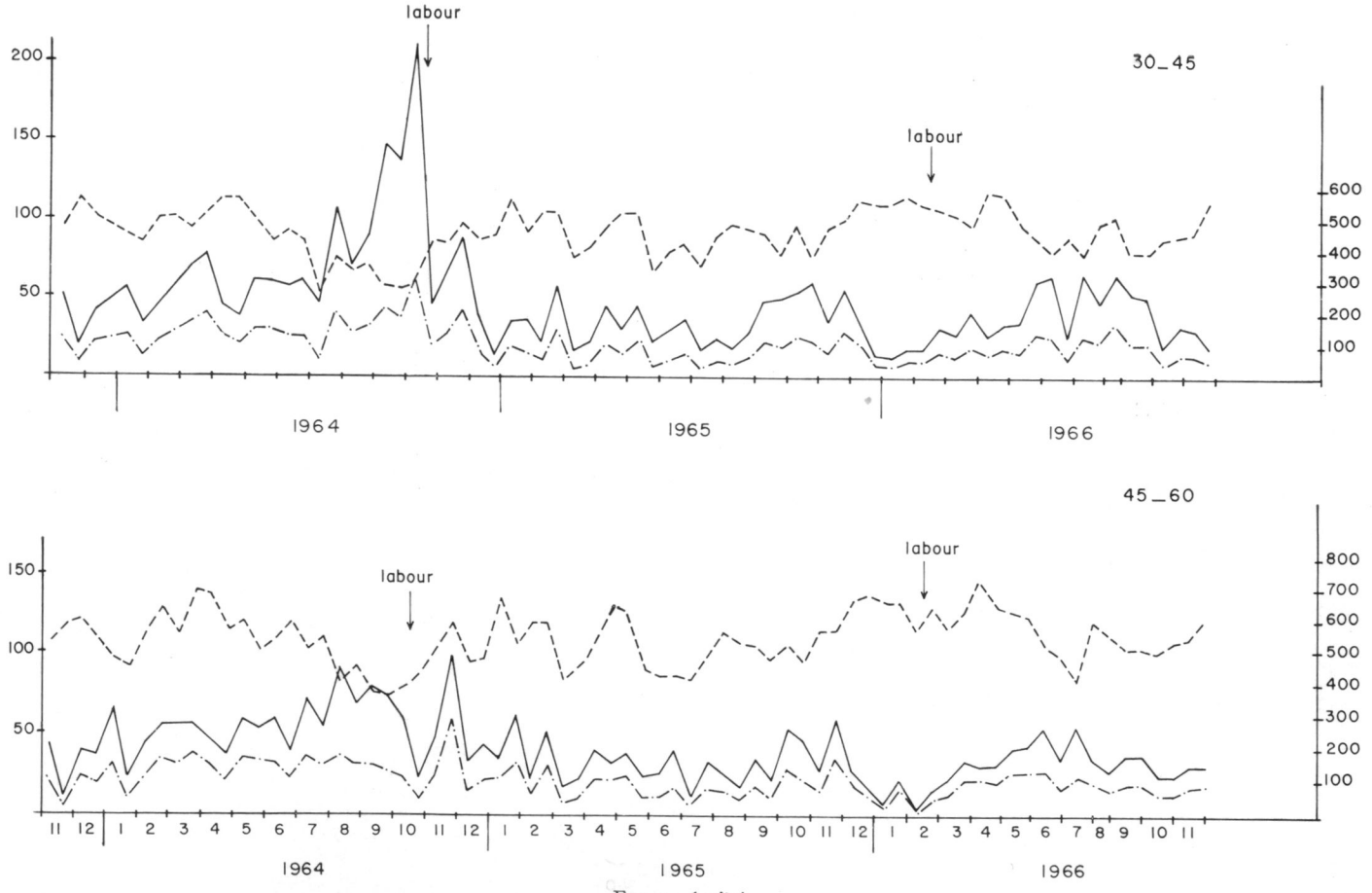

labour
30_45
labour
200
150
100
50
600
500
400
300
200
100
1964
1965
1966
45_60
labour
labour
150
100
50
800
700
600
500
400
300
200
100
11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1964
1965
1966

FIG. 1. *(suite)*

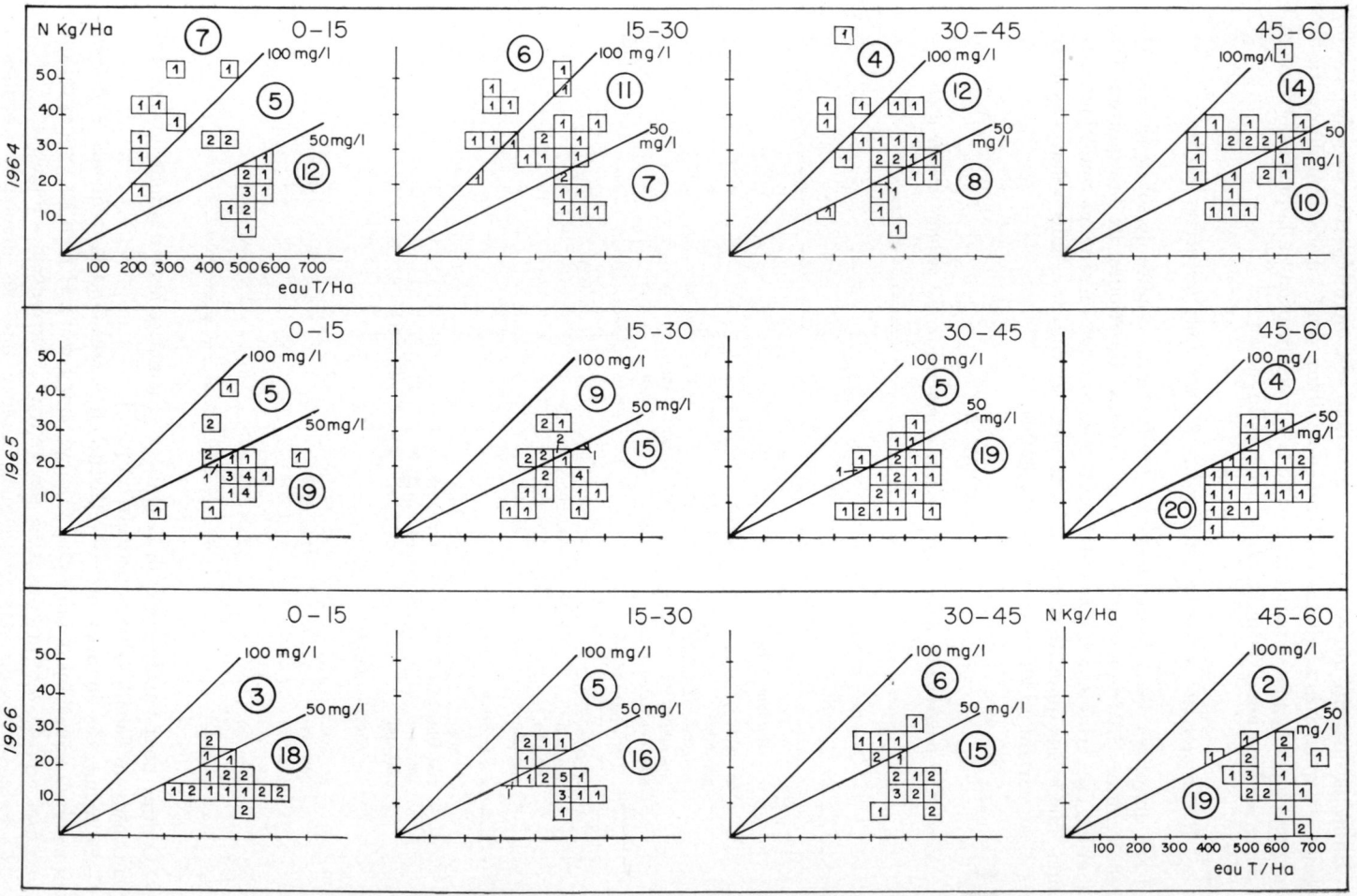


FIG. 2. *Position des composantes de la concentration en azote minéral de la solution du sol.*
Répartition, par horizon de 15 cm, du nombre annuel de prélèvements compris dans des classes de 50 litres et 5 kg d'azote minéral

Enfin, la quantité globale d'azote disponible se trouve répartie, dans les divers niveaux, en quantités aliquotes relativement faibles, dont l'utilisation dépendra de la progression de la masse radiculaire et de la « concentration » à laquelle se trouvera cet azote, en fonction des conditions hydriques du milieu.

Remarques sur les quantités d'eau contenues dans les divers niveaux

Les quantités d'eau contenues dans une épaisseur donnée de sol dépendent des caractéristiques hydriques du sol, des conditions climatiques, de l'évapotranspiration et il n'est certainement pas indifférent de savoir que suivant ces conditions extérieures, une même quantité d'azote minéral peut se trouver « diluée » dans des quantités d'eau variant au moins du simple au double.

TABLEAU 2

Nombre de prélèvements ayant, par horizon, et par année une quantité donnée d'eau

Quantités d'eau T/Ha	Humidité corresp. % terre sèche	1964	1965	1966
Horizon 0-15				
< 300	< 15	5	1	0
300-400	15-20	2	0	3
400-500	20-25	6	12	9
500-600	25-30	11	10	7
600-700	30-35	0	1	2
Horizon 15- 0				
< 300	< 15	5	0	0
300-400	15-20	3	5	5
400-500	20-25	10	11	13
500-600	25-30	6	8	3
Horizon 0-45				
< 300	< 14,5	3	0	0
300-400	14,5-19,3	4	5	1
400-500	19,3-24,2	11	11	11
500-600	24,2-29	6	8	9
Horizon 45-60				
< 300	< 12,7	0	0	0
300-400	12,7-16,9	3	0	0
400-500	16,9-21,1	7	9	2
500-600	21,1-25,3	8	8	10
600-700	25,3-29,5	6	7	9

Comme pour l'azote minéral, la figure 1 schématise les variations de quantités d'eau trouvées dans les divers niveaux du profil.

De même, ces données ont été réparties en classes dont la fréquence d'observation a été résumée dans le tableau 2. Comme pour l'azote, et pour les mêmes raisons, les chiffres représentent des quantités par ha (en l'occurrence des tonnes/ha).

Ce tableau, associé aux graphiques, montre que des quantités voisines de

550 t/ha d'eau, contenues dans une épaisseur de 15 cm de ce sol, représentent approximativement leur capacité de rétention au champ.

Des quantités inférieures à 300 t/ha n'ont été observées entre 0 et 45 cm qu'après une période de sécheresse en 1964 et une fois en 1965, dans le niveau 0-15. Ces humidités doivent correspondre à des conditions de sécheresse peu fréquentes et représentent des valeurs inférieures à celle du point de flétrissement.

Enfin, les quantités comprises entre 600-700 t/ha ne sont observées avec une fréquence assez grande que dans le niveau 45-60 et doivent représenter la valeur de la rétention maximum.

Remarques sur les concentrations

L'évolution des concentrations de la solution du sol en azote minéral est représentée sur la figure 1.

Ne connaissant pas encore la signification à attribuer à ces valeurs, mesurées dans les conditions naturelles, nous les avons comparées aux concentrations utilisées pour réaliser des solutions coulantes (CHOUARD, 1952).

Cinquante mg/litre est la concentration minimum, la moyenne étant située à 130 mg/litre environ et le maximum à plus de 200 mg/litre. Partant du chiffre minimum de 50 mg/litre, nous avons regroupé les résultats en trois classes (tabl. 3) :

inférieurs à 50 mg/litre
compris entre 50 et 100 mg/litre
supérieurs à 100 mg /litre

L'observation des résultats montre que des concentrations supérieures à 100 mg/litre sont généralement obtenues pour des teneurs en eau relativement faibles. La lecture des graphiques 2 permet en effet de situer facilement ces cas et l'on peut observer la simultanéité de fortes quantités d'azote et de faibles quantités d'eau.

Il est donc nécessaire d'accompagner le chiffre de concentration de la valeur d'un des membres du rapport servant à la calculer, afin de savoir si une teneur élevée est due à une accumulation d'azote — circonstance favorable — ou à la diminution de la quantité d'eau dans une limite incompatible avec un développement végétal normal, ou à la simultanéité de ces deux phénomènes.

Nous avions déjà observé à Antibes que l'accumulation d'azote minéral était souvent corrélative d'une diminution considérable de la teneur en eau et que cet azote minéralisé ne pouvait être utilisé par la végétation que dans la mesure où les pluies réhumectaient le sol. Il faut donc bien insister sur le fait que de fortes concentrations en azote de la solution du sol ne sont pas forcément synonymes de conditions les plus favorables à son utilisation.

Des concentrations supérieures à 100 mg/litre n'ont été observées en 1964 (17 fois) que dans les trois premiers niveaux, de 0 à 45 cm. Elles correspondent à des quantités d'azote toujours supérieures à 25 kg/ha et à des quantités d'eau toujours inférieures à 500 m^3 dans 15 cm et, pour 14 fois sur 17, inférieures à 350 m^3/ha.

D'après la construction même des graphiques, cette quantité de 25 kg/ha (pour 15 cm) représente également une limite supérieure au-dessous de laquelle se situe la

grande majorité des concentrations inférieures à 50 mg/litre. (Cependant des quantités inférieures à 25 kg/ha, liées à de très faibles teneurs en eau permettent exceptionnellement d'atteindre des concentrations supérieures.)

TABLEAU 3

Répartition, par horizon, du nombre de prélèvements suivant leur concentration en azote minéral, exprimée en mg/litre

	1964	1965	1966
Horizon 0-15			
< 50	12	19	18
50 <-< 100	5	5	3
> 100	7	0	—
Horizon 15-30			
< 50	7	15	16
50 <-< 100	11	9	5
> 100	6	0	—
Horizon 30-45			
< 50	8	19	15
50 <-< 100	12	5	6
> 100	4	—	0
Horizon 45-60			
< 50	10	20	19
50 <-< 100	14	4	2
> 100	0	0	0
Total			
< 50	37	73	68
50 <-< 100	42	23	16
> 100	17	0	0
	96	96	84

L'intervalle de concentration compris entre 50 et 100 mg/litre semble donc être celui qui, dans nos conditions expérimentales, corresponde le mieux à une efficacité optimale pour les végétaux, tant par la quantité d'azote (plus de 25 kg/ha dans 15 cm) que par la quantité d'eau disponible, comprise entre des valeurs insuffisantes ou excessives.

CONCLUSIONS

Ces premières observations, faites sur des données recueillies dans les conditions naturelles, permettent de faire ressortir les points suivants :

— la concentration à laquelle se trouve une quantité donnée d'azote minéral dans la solution du sol peut varier dans de grandes proportions ;

— pour avoir une plus juste appréciation de cette concentration, il est nécessaire de l'accompagner de la valeur d'un des membres du rapport qui permet de la calculer.

En effet, de fortes concentrations sont parfois obtenues avec des humidités de sols très faibles et incompatibles avec un développement végétal. De même, les concentrations les plus faibles sont corrélatives de la présence d'un excès d'humidité.

— En excluant donc les extrêmes de teneurs en eau, on peut obtenir une « fourchette » de concentrations (dont les limites restent à préciser) qui serait plus représentative des possibilités d'action de l'azote minéral dans le sol.

Reçu pour publication en novembre 1969.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement ceux qui ont apporté leur collaboration à ce travail :
— G. Hiroux et R. Lefèvre de la Station Agronomique d'Amiens qui ont installé le dispositif expérimental et assuré les prélèvements et la préparation des échantillons,
— J. Kottelanne de la Station Agronomique de Laon qui a effectué les dosages,
— et Nicole Bracquart qui a exécuté tous les graphiques.

SUMMARY

OBSERVATIONS ON SIMULTANEOUS VARIATION OF THE WATER AND MINERAL NITROGEN-CONTENT OF A SOIL

By periodic measurement of the quantities of mineral nitrogen and water in a given soil, the development of their ratio can be followed. The mineral nitrogen concentration in the soil solution when thus measured shows a greater amplitude of variation than that of the two ratio constituents.

The significance of these variations car be found in the conditions prevailing at their occurence and in their possible effect on such phenomena as radicle absorption, migration, mineralization and reorganisation.

ZUSAMMENFASSUNG

BEOBACHTUNGEN UBER DIE GLEICHZEITIGEN VARIATIONEN VON WASSERGEHALT UND GEHALT AN MINERALISCHEM STICKSTOFF EINES BODENS

Die periodische Messung der im Boden angetroffenen mineralischen Stickstoff-und Wassermengen erlaubt ihre Beziehungen zu verfolgen. Die auf diese Weise gemessene Konzentration der Bodenlösung an mineralischem Stickstoff zeigt grössere Variationen als diejenigen der zwei Bestandteile des Verhältnisses.

Die Bedeutung dieser Variationen ist in den Umständen, die an ihrer Entstehung beteiligttind, zu sucher, wie und in ihrem Einfluss auf die eventuell daraus folgenden Phänomene (Absorp sion durch die Wurzeln, Wnaderungen, Mineralisierung und Neuorganisation).

Наблюдения над одновременными изменениями содержания воды и минерального азота в почве.

Г. ЛЕФЕВР.

РЕЗЮМЕ

Периодическое измерение количесть минерального азота и влаги в почве позволяет проследить эволюцию их соотношения. Измеренная таким образом концентрация минерального азота в почвенном растворе представляет более широкую амплитуду изменений, чем амплитуда каждой из составных соотношения.

Значение этих вариаций нужно искать в обстоятельствах вызывающих их проявление, и в их влиянии на явления из них непосредственно вытекающие (корневое поглощение, миграции минерализация и реорганизация).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHOUARD P., 1952. *Cultures sans sol.* Maison Rustique Édit.

LEFÈVRE G., HIROUX G., HÉBERT J., KOTTELANNE J., 1965. Observations sur la minéralisation de l'azote en sol nu. *C. R. Acad. Agric.*, 852-858.

Ann. agron., 1969, **20** (6), 639-643.

NOTE

NOUVELLES OBSERVATIONS SUR LA PRÉSENCE DE GIBBSITE DANS LES ZONES D'ALTÉRATION SUPERFICIELLE ET LES SOLS DES MASSIFS CRISTALLINS ET CRISTALLOPHYLLIENS

J. DEJOU, J. GUYOT, Colette CHAUMONT et Huguette ANTOINE

Station agronomique, 36 - Châteauroux
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

De nouveaux prélèvements effectués dans les arènes et sols reposant sur leucogranites du Massif central révèlent à tous les niveaux des profils la présence de gibbsite. Celle-ci a été mise en évidence également dans la phase < 2 μ extraite d'un gore et d'un sol sur micaschiste à 2 micas.

INTRODUCTION

Lors de deux notes précédentes (DEJOU *et al.*, 1967, 1968), nous avons signalé la présence de gibbsite dans la fraction < 2 μ extraite de quelques arènes et sols reposant sur leucogranites du Morvan-Nord, du Cantal et du Limousin. MAUREL (1968) avait montré aussi toute l'importance de ce minéral dans les arènes du Sidobre et de la Montagne Noire, tout comme BALL (1964) dans des sols sur granite à biotite du Pays de Galles et WILSON (1967) dans la phase 50-200 μ de sols dérivés de gabbros quartziques riches en biotite du district d'Aberdeen. Et, tout récemment, ERHART (1968) a précisé qu'il avait également découvert la gibbsite en de nombreux gisements granitiques, très éloignés les uns des autres, puisqu'il cite le Massif central, les Vosges, la Forêt Noire, les Pyrénées, les Maures et le Tanneron.

De notre côté, nous avons poursuivi nos recherches en plusieurs régions et les quelques observations recueillies font l'objet de cette nouvelle note.

Dans le Cantal, 3 profils ont été étudiés, tout comme dans le Limousin. Il s'agit d'arènes plus ou moins épaisses et de sols bruns acides, à mull oligotrophe, résultant de l'altération superficielle de leucogranites assez voisins dans leur structure, de tendance porphyroïde et dans leur composition minéralogique. Le type retenu au Rabaseix, près d'Eymoutiers (Haute-Vienne), a pour paramètres CPIW : I, 3′, 1′ (2), 3 (3′, 1, 1, 3) et contient les minéraux suivants : quartz : 37,5 p. 100 feldspath potassique : 28 p. 100, albite : 20 p. 100, biotite + muscovite : 12 p. 100, minéraux opaques : 2 p. 100.

La phase < 2 μ contenue dans ces formations, mais aussi les fractions 2-10 μ et 10-20 μ pour l'une d'entre elles, ont été isolées et soumises au diagnostic des trois techniques, absolument fondamentales pour l'identification de la gibbsite : rayons X, analyse thermo-pondérale et analyse thermique différentielle. En particulier, cette dernière est déterminante par l'apparition de son crochet endothermique caractéristique entre 275 et 280°C. Toutes ont confirmé la présence du minéral quel que soit le niveau du prélèvement effectué, et quelle que soit la profondeur de l'arène, même si le sol repose directement sur la roche-mère en l'absence d'une zone d'altération. Le tableau 1 situe quelques résultats de ces estimations, qui s'avèrent très variables suivant les prélèvements. La majeure part de la gibbsite, souvent bien cristallisée est concentrée dans la phase < 2 μ, mais les éléments 2-10 μ et 10-20 μ peuvent aussi en contenir, le pourcentage de cette dernière fraction se révélant toutefois très faible.

Il se confirme ainsi que la présence de gibbsite s'avère assez générale dans les leucogranites des zones prospectées ; cependant nos recherches n'ont donné aucun résultat dans un granite à 2 micas, à grain fin de Haute-Loire à Védrinettes. De même, une arène sur granite à 2 micas très cataclasé de Saint-Étienne-de-Montluc (Loire-Atlantique) n'a pas livré de gibbsite, ce qui traduit ici l'absence de corrélation entre les effets de cisaillement mécanique intense de la roche et la genèse du minéral.

A ce propos, la consultation du tableau 1, ainsi que d'autres résultats qui n'ont pas été rapportés dans cette note, montrent dans l'ensemble un accroissement de la teneur en gibbsite au fur et à mesure que l'on s'élève dans le profil, où les processus de désagrégation s'intensifient, ce qui corrobore en l'occurrence qu'il s'agit d'un minéral d'altération formé aux dépens des constituants primaires de la roche, susceptible de s'élaborer de façon continue, même sous nos climats. De plus, ce minéral se forme dès le début de l'altération de la roche, comme le montre de façon indiscutable l'analyse thermique différentielle de 5 leucogranites assez frais du Limousin et des mêmes échantillons altérés, mais encore cohérents. Les diagrammes dont quelques exemples sont représentés dans la figure 1 indiquent, en effet, un développement très net du pic endothermique à 275°C dû à la déshydratation de la gibbsite, corrélativement avec l'altération progressive des leucogranites. Mais, ce test exige un écrasement intense des matériaux, à telle enseigne qu'il est nécessaire de disposer des particules < 2 μ récoltées par sédimentation pour pouvoir le mettre en évidence.

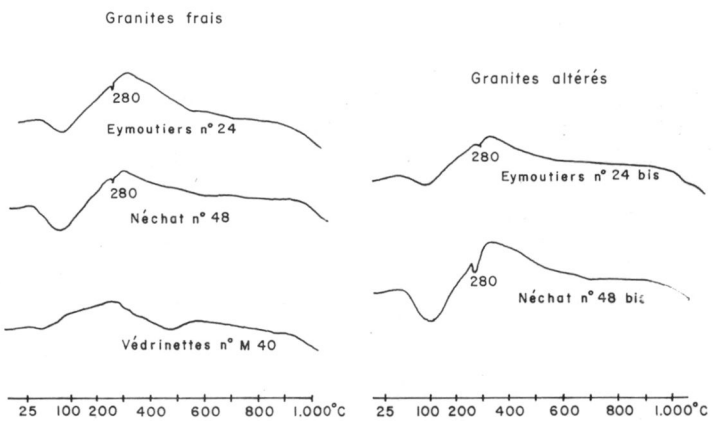


FIG. 1. — *Analyse thermique différentielle de la phase < 2 μ extraite des granites*

Jusqu'ici, les différents chercheurs avaient surtout étudié la gibbsite dans les massifs granitiques ; l'examen de la décomposition des micaschistes à 2 micas de Trézennes (Haute-Vienne) montre qu'elle n'est pas l'apanage de ces seuls secteurs, mais qu'elle se rencontre également dans la zone d'altération et les sols établis sur ces roches, surtout dans la phase < 2 μ, fait rare-

TABLEAU I

Situation géographique du prélèvement		N° échantillon	Horizon et profondeur du prélèvement (en cm)	Teneur en argile < 2 µ en % de l'échantillon global	P. 100 de gibbsite dans la phase < 2 µ	Teneur en gibbsite en % de l'échantillon global			Teneur totale en gibbsite en % de l'échantillon global
						dans la phase			
						< 2 µ	2-10 µ	10-20 µ	
a) *Évaluation de la teneur en gibbsite dans quelques prélèvements sur granites à 2 micas*									
Cantal	Marcolès	C 23	(0- 20)	12,0	18,2	2,20			
		C 22	C (55- 70)	4,0	37,5	1,50			
		C 20	C (250-300)	3,3	43,0	1,42			
Haute-Vienne	La Salesse	611	A_{11}(0- 18)	11,1	5,3	0,70			
		612	A_{12}(25- 45)	8,9	5,5	0,50			
	Le Rabaseix	111	A (0- 20)	10,0	7,7	0,77			
	Serre	244	A_{12}(30- 40)	11,0	10,5	1,15	0,15	0,03	1,33
		245	(B)(50- 70)	8,8	11,0	0,97	0,38	0,07	1,42
		246	C (95-135)	3,7	13,2	0,49	0,27	0,07	0,83
b) *Sur micaschistes à 2 micas*									
Haute-Vienne	Trézennes.....	45	A_{11}(0- 20)	16,2	3,0	0,5			
		44	A_{12}(40- 55)	10,9	3,6	0,4	0,06	traces	0,46
		43	C (220-250)	2,2	7,5	0,16	0,12	0,03	0,31

ment signalé à notre connaissance. Ces micaschistes sont formés essentiellement de quartz : 37,5 p. 100 et de phyllites : 55,3 p. 100, les plagioclases étant pratiquement absents : 0 à 2 p. 100. Eu égard à la faible dimension des cristaux, il n'a pas été possible d'isoler les micas de Trézenne pour suivre leur propre altération. Mais l'étude de 3 échantillons de muscovite récoltés au sein d'arènes granitiques voisines n'ayant pas donné de gibbsite, il est plausible d'avancer, dans ce cas particulier, que la gibbsite tire uniquement son origine de l'altération des biotites, ce qui confirme le « rôle clé » de ce minéral selon l'expression de WILSON (1947) dans la genèse des hydroxydes d'alumine.

Enfin, le dépouillement des données analytiques de 18 échantillons d'argile $< 2\ \mu$ a permis de mettre en évidence une corrélation négative, très hautement significative, même pour $P = 0{,}001$ entre les valeurs du rapport moléculaire $ki = SiO_2/Al_2O_3$ et les teneurs en gibbsite contenue dans cette fraction (fig. 2). Elle s'exprime par la droite de régression $y = -21{,}75\ x + 52{,}43$ avec $r = -0{,}881$:

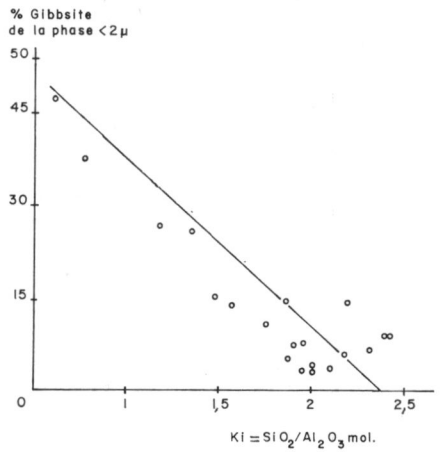


FIG. 2. — *Corrélation rapport* SiO_2/Al_2O_3, *teneur en gibbsite dans la phase* $< 2\ \mu$ *extraite des arènes et sols granitiques du Massif central*

En conclusion, il apparaît que la gibbsite peut être considérée comme un minéral banal de l'altération géochimique des granites de nos régions. Mais ce n'est que lorsque nous disposerons de nouvelles informations recueillies en zones cristallophyliennes que nous pourrons juger de l'importance réelle du phénomène.

Reçu pour publication en septembre 1969.

SUMMARY

NEW OBSERVATIONS ON THE PRESENCE OF GIBBSITE IN AREAS OF SUPERFICIAL DECOMPOSITION AND SOILS OF CRYSTALLINE AND CRYSTALLOPHYLLIC MASSIFS

New samples taken from the sands and soils lying over the leucogranites of the Massif Central show the presence of gibbsite at all profile levels. It has been found in both the phase $< 2\mu$ extracted from a gore and from soil above 2-layered mica schist.

ZUSAMMENFASSUNG

Neue Beobachtungen über das Vorkommen von Gibbsit in den oberflächlichen Verwitterungszonen und den Böden kristalliner und kristallin-blättriger Grundgebirge

Neue Probeentnahmen in den auf den Leukograniten des Massif Central ruhenden Sanden und Böden zeigen für sämtliche Profilhorizonte die Gegenwart von Gibbsit an. Letztere wurde ebenfalls in der einem tauben Gestein und einem zweiglimmerigen Glimmerschiefer entnommenen $< 2\ \mu$. Phase ermittelt.

РЕЗЮМЕ

Заметка. *Новые данные о присутствии гиббсита в зонах поверхностного выветривания и в почвах кристаллических и кристаллоносных массивов.*

Ж. ДЭЖУ, Ж. ГЮЙЙО, КОЛЕТТА ШОМОН, ЮГЕТТА АНТУАН.

Изучение новых образцов песков и почв залегающих на леуко-гранитах Центрального Массива указывает на присутствие гиббсита на всех уровнях исследованных профилей. Оно было также отмечено в фазе $< 2\ \mu$ выделенной из слюдянного песка и из почвы залегающей на двуслюдянном сланце.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ball F. D., 1964. Gibbsite in altered granitic rock in North Wales. *Nature*, **204**, 673-674.

Dejou J., Guyot J., Chaumont Colette, Antoine Huguette, 1967. Présence de gibbsite et de gels alumino-siliciques dans la fraction argileuse extraite de quelques arènes et sols du massif de granite à deux micas de la Pierre-qui-Vire (Yonne-Nièvre). *C. R. Acad. Sci.*, **264**, série D, **16**, 1973-1976.

Dejou J., Guyot J., Pedro G., Chaumont Colette, Antoine Huguette, 1968. Nouvelles données concernant la présence de gibbsite dans les formations d'altération superficielle des massifs granitiques (cas du Cantal et du Limousin). *C. R. Acad. Sci.*, 266, Série D, **18**, 1825-1827.

Erhart H., 1968. Sur les trois modes géochimiques d'accumulation des hydroxydes d'alumine dans la nature. *C. R. Acad. Sci.*, 267, série D, **25**, 2081-2083.

Maurel P., 1968. Sur la présence de gibbsite dans les arènes du massif du Sidobre (Tarn) et de la Montagne Noire. *C. R. Acad. Sci.*, 266, Série D, **7**, 652-653.

Wilson M. J., 1947. *Clays and Clay minerals*, **7**, 91-100.

Ann. agron., 1969, **20** (6), 645-648.

NOTE ANALYTIQUE

EXTRACTION ET DOSAGE DES IONS-PHOSPHATE DES SOLUTIONS DE SOL

J.-C. FARDEAU, J.-P. MICHEL
avec la collaboration technique de Jocelyne JAPPE

Commissariat à l'Énergie atomique, Département de Biologie, Service de Radioagronomie, CEN Cadarache, BP nº 1 13 - Saint-Paul-lez-Durance, France

SOMMAIRE

La détermination de l'intensité des échanges isotopiques requiert une mesure précise de l'activité spécifique des ions-phosphate des solutions de sol : on décrit à cet effet une méthode d'extraction par l'isobutanol du complexe phosphomolybdique suivie d'un dosage du molybdène par absorption atomique.

INTRODUCTION

La mobilité des ions-phosphate retenus sur la phase solide du sol peut être étudiée par dilution isotopique en milieu aqueux, sous réserve que leur concentration soit déterminée avec précision. Ce sont, en effet, les erreurs de dosage chimique, d'autant plus importantes que le sol est plus pauvre, qui risquent d'affecter la détermination de l'activité spécifique du phosphore (FARDEAU et MARINI, 1968).

PRINCIPE

Les solutions du sol contiennent du phosphore sous de nombreuses formes (C. A. ANDERSON, 1965) que l'on peut classer ainsi :

— phosphore minéral à l'état d'ions-orthosphosphate,

— phosphore organique plus ou moins rapidement hydrolysable en milieu acide à froid (G. ANDERSON, 1963),

— phosphore organique hydrolysable en milieu acide chaud (R. L. THOMAS, 1966).

Les méthodes colorimétriques de dosage de phosphate font toutes appel à des réactifs acides contenant du molybdène en grand excès, qui provoquent l'hydrolyse de certains composés phosphorylés labiles variables selon les sols et les saisons. De plus, les très faibles teneurs en phosphate de ces solutions obligent à utiliser non pas une colorimétrie directe de l'acide phosphomolybdique, mais une colorimétrie de son composé réduit bleu, obtenu soit à froid par le chlorure stanneux (CHANG et JACKSON, 1957) ou l'hydroquinone, soit à chaud par le sulfate d'hydrazine ou l'acide ascorbique (FOGG et WILKINSON, 1958). L'instabilité de certains réducteurs, la facilité avec laquelle peut se former le bleu de molybdène, sont autant de causes supplémentaires d'erreurs.

Quant au comptage du phosphore 32, il est toujours effectué directement sur la solution, sans séparation préalable des ions-phosphate. Cette technique n'est valable que si les composés organiques phosphorylés en solution ne contiennent pas de groupe phosphate isotopiquement échangeable, hypothèse qui semble rarement vérifiée. Il est possible d'éviter cet inconvénient en faisant appel aux méthodes qui consistent à séparer l'acide phosphomolybdique par un solvant organique, tel que l'isobutanol selon PONS et GUTHRIE (1946), et à en déterminer l'activité spécifique. La reproductibilité des résultats est ainsi améliorée, mais dans ce cas aussi les réactifs introduits abaissent le pH à une valeur proche de zéro, toujours susceptible de provoquer l'hydrolyse de phosphore organique. ZAUGG (1966) a récemment préconisé, pour d'autres usages, une méthode qui consiste à doser par absorption atomique le molybdène de l'acide phosphomolybdique après extraction de celui-ci par le 2-octanol. Cette technique, qui supprime l'étape de la réduction est bonne, mais en raison des difficultés de manipulation de l'octanol (odeur et viscosité) nous proposons d'utiliser un autre solvant : l'isobutanol. D'autres modifications, non moins importantes, sont aussi apportées à la méthode de ZAUGG. Les solutions de sol contiennent de 30 à 400 p.p.m. de silice selon JONES (1967) alors que leur teneur en phosphore dépasse rarement 2 p.p.m. Or les réactifs molybdiques réagissent avec la silice pour former plus ou moins rapidement un complexe silicomolybdique. Il en va de même de son composé bleu se formant dans des conditions similaires de réduction. C'est pourquoi dans la méthode préconisée, le pH d'extraction est fixé à 1,7, valeur à laquelle le silicomolybdate n'est pas extrait ; ceci offre un avantage supplémentaire, puisqu'à ce pH, l'hydrolyse des composés phosphatés demeure très limitée. Enfin, toujours dans le même but, la concentration en molybdène de la solution au cours de la réaction est abaissée de 5×10^{-2} M à 5×10^{-3} M.

MODE OPÉRATOIRE

Réactifs

— Solution molybdique acide.

$(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ 4 H_2O	.....	90 g
H_2SO_4 10 N	.....	400 ml
H_2O	q.s.p.	1 000 ml

Le molybdate est tout d'abord dissous dans l'eau. La solution de molybdate et l'acide sulfurique sont portés au réfrigérateur, puis mélangés de telle façon qu'en aucun cas la température ne dépasse 20°, sans quoi le réactif serait instable.

— Isobutanol Merck.

— H_2SO_4 N.

Technique expérimentale

Mettre dans une ampoule à décanter 20 ml de solution à analyser contenant en tout de 1 à 10 µg de phosphore. Ajouter 0,1 ml de solution molybdique. Agiter énergiquement et verser

aussitôt 10 ml d'isobutanol. Agiter de nouveau énergiquement, laisser décanter, puis éliminer la phase aqueuse le plus rapidement possible.

Toutes ces conditions réunies : faible acidité, basse concentration en molybdène, temps limité de contact entre réactif et solution, sont suffisantes pour rendre négligeable l'hydrolyse des composés phosphorylés labiles des solutions de sol.

Placer la phase organique dans un tube à centrifuger, rincer l'ampoule à décanter avec 10 ml de H_2SO_4 N que l'on transfère dans le tube. Agiter vigoureusement. Cette opération, qui a pour but d'éliminer le molybdène passé en excès dans l'isobutanol au cours de la première extraction, est particulièrement importante. Centrifuger et effectuer le dosage du molybdène directement par absorption atomique dans la phase organique surnageante du tube de centrifugeuse.

L'appareil utilisé ici est un Perkin-Elmer 303 équipé d'un brûleur de Boling (3 fentes) placé dans le sens du faisceau. Les réglages sont les suivants :

lampe molybdène : 30 mA
longueur d'onde : 3 133 Å
Air : pression = 30 psi ; débit = 30 l/mn

Le débit du liquide organique est de 2 cm^3/mn ; le faisceau au centre du brûleur est à la limite de la flamme chaude (bleue) dans la zone froide (jaune). Quant au phosphore 32, il est compté après évaporation sur coupelle d'un volume connu de la phase organique.

RÉSULTATS

La sensibilité (absorbance/µg P) est de 0,045 entre 1 et 10 µg de phosphore présent dans la prise d'essai initiale. Il est ainsi possible d'atteindre des traces (0,05 µg P/ml) directement sans concentration préalable des solutions de sol, puisque cette méthode est 5 fois plus sensible que les méthodes à froid faisant appel à la réduction du complexe phosphomolybdique.

CONCLUSION

Cette technique, qui permet une séparation des ions-phosphate des solutions de sol et leur détermination précise (1 µg P), est particulièrement bien adaptée pour l'étude des cinétiques d'échanges isotopiques dans les systèmes sol-solution, la connaissance exacte de leur activité spécifique, déterminée ici dans la phase organique étant une condition nécessaire à une étude précise du phénomène.

Reçu pour publication en décembre 1969.

SUMMARY

EXTRACTION AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF PHOSPHATE IONS IN SOIL SOLUTIONS

Determining the intensity of isotopic exchanges requires measurement of the specific activity of phosphate ions in soil solutions. For this purpose, the authors describe a method of extracting the phosphomolybdic complex using isobutanol followed by dosage of the molybdenum by atomic absorption.

ZUSAMMENFASSUNG

EXTRAKTION UND DOSIERUNG DER PHOSPHATIONEN DER BODENLÖSUNGEN

Die Bestimmung der Intensität der isotopischen Austauschvorgänge verlangt eine Messung der spezifischen Aktivität der Phosphationen der Bodenlösungen : zu diesem Zwecke wird eine

Extraktionsmethode mittels Isobutanol des Phosphor-Molybdän-Komplexes mit anschliessender Molybdändosierung durch atomische Absorption vorgeschlagen.

Экстрагирование и дозировка фосфат-ионов почвенных растворов.

Аналитическая заметка.

Ж. К. ФАРДО, Ж. П. МИШЕЛЬ.

РЕЗЮМЕ

Определение интенсивности изотопного обмена требует измерения удельной активности фосфат-ионов почвенных расворов : автор описывает методику экстрагирования фосфорно-молибденового комплекса изобутанолом, с последующей дозировкой молибдена с помощью атомного поглощения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON C. A., 1965. Separation of organic and inorganic phosphorus in soil extracts by mechanical and chromatographic filtration. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **29**, 255-259.

ANDERSON G., HANCE R. J., 1963. Investigation of an organic phosphorus component of fulvic acid. *Plant Soil*, **29** (3), 296-303.

CHANG S. C., JACKSON M. L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, **84**, 134-144

FARDEAU J. C., MARINI P., 1968. Détermination par échange isotopique en retour, du compartiment des ions-phosphate les plus mobiles du sol. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **267**, 427-430, série D.

FOGG D. N., WILKINSON, 1958. The colorimetrie determination of phosphorus. *The Analyst.*, **83**, 406-414.

JONES L. H. P., HANDRECK K. A., 1967. Silica in soils, plants and animals. *Adv. Agron.*, **19**, 107-149.

PONS W. A., GUTHRIE I. D., 1946. Determination of inorganic phosphate in plants material. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, **18**, 184.

THOMAS R. L., 1966. The occurrence of high molecular weight organic phosphorus compounds in soil. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **30** (6), 799-801.

ZAUGG W. S., 1966. Indirect determination of inorganic phosphate by atomic absorption spectrometric determination of molybdenum. *Anal. Chem.*, **38** (12), 1759-1760.

Ann. agron., 1969, **20** (6), 649-652.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1969

R. Blanchet, M. Bosc. — Réactions d'échange et principaux facteurs de l'alimentation potassique des plantes dans deux sols de textures différentes.. 457
R. Bonhomme. — Contribution à l'étude de la composition spectrale des rayonnements d'origine solaire à l'air libre et sous une serre 183
M. Bouat. — L'utilisation du potassium 40 et du potassium 42 en agronomie.. 89
M. Clairon, W. Routchenko. — Contrôle de la nutrition minérale des plantes par l'analyse des extraits de tissus conducteurs. Application à la Luzerne. 201
A. P. Conesa. — Quelques aspects de la distribution du phosphore en sol calcaire 225
M. Coppenet. — Résultats de douze années d'observations lysimétriques à Quimper (1954-1965)..... 111
Marielle Courau. — Étude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans des milieux poreux artificiels 5
J. Decau. — Contribution à l'étude de l'influence des conditions de milieu sur la répartition de l'azote dans le sol. II. — Acides aminés extraits par hydrolyse 35
J. Decau. — Contribution à l'étude de l'influence des conditions de milieu sur la répartition de l'azote dans le sol. III. — Acides aminés et conditions d'aération 277
J. Dejou, J. Guyot, Colette Chaumont, Huguette Antoine. — Nouvelles observations sur la présence de gibbsite dans les zones d'altération superficielle et les sols des massifs cristallins et cristallophylliens 639
M. Dupuis. — Dosage des carbonates dans les fractions granulométriques de quelques sols calcaires et dolomitiques 61
A. Faure. — Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol. I. — Étude de la géométrie des versoirs. Classification 565
A. Feodoroff, J-L. Ballif. — Étude de l'infiltration de la pluie *in situ* à l'aide de tensiomètres..... 475
J. Guyot. — Mesure des surfaces spécifiques des argiles par adsorption..... 333
P. Jacquard, L. Croisier, G. Monnier. — Étude des effets résiduels des cultures fourragères sur les cultures arables. I. — Effets résiduels de la luzerne sur le Blé et le Maïs..... 371
C. Juste, J. Delas. — Influence du degré de salification d'un composé humique sur son comportement thermique 145
G. Lefevre, G. Hiroux. — Effets et arrière-effets sur blé d'une fumure azotée sur *Ray-grass d'Italie* 15

G. LEFÈVRE. — Observations sur les variations simultanées des teneurs en eau et en azote minéral d'un sol 627
F. LEMAIRE. — Action des nitrites sur les végétaux..... 317
H. MANICHON, M. SÉBILLOTTE. — Un exemple de détermination de références techniques : les temps de travaux. Contribution à un meilleur choix de l'assolement..... 305
J.-R. MARTY, Marielle COURAU. — Influence du système de culture sur l'écoulement de l'eau dans un sol mal structuré 361
M. MINGEAU. — Action de la nutrition minérale sur l'économie de l'eau dans la plante. I. — Équilibre absorption-transpiration 263
R. MOREL. — Essai de déterminations quantitatives relatives à l'évolution de l'azote dans un sol cultivé en équilibre azoté 161
R. PROST. — Remarques générales sur l'application de la spectroscopie infrarouge à l'étude des silicates 547
J. PUECH. — Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption 245
J. PUECH. — Capacité de cession de l'eau des sols et essai d'interprétation des débits 505
J. PUECH, C. MAERTENS, J.-R. MARTY. — Modalités du dessèchement du sol sous des cultures plantées en lignes espacées..... 597
Ginette SIMON-SYLVESTRE. — Les sulfates « solubles » du sol 435
Ginette SIMON-SYLVESTRE. — Premiers résultats d'une enquête sur le soufre total des sols cultivés français 609

Note complémentaire :

J. DEJOU, J. GUYOT, J. MORIZET, M. JAMAGNE, Marguerite MARIN. — Les sols noirs, très riches en matières organiques reposant sur leucogranites dans la région d'Eymoutiers-Peyrat-le-Château (Haute-Vienne)..... 517

Note analytique

J.-C. FARDEAU, J.-P. MICHEL. — Extraction et dosage des ions-phosphate des solutions de sol 645
Éliane MORÉ. — Sur le microdosage colorimétrique du cobalt dans les végétaux : interférence du fer, contamination par la terre 527

Chronique des livres 105, 217, 449, 539

CONTENTS

R. Blanchet, M. Bosc. — Exchange reactions and chief factors of potassic plant nutrition in two soils of different texture 457
R. Bonhomme. — Contribution to the study of the spectral distribution of solar radiation in the open air and in greenhouses 183
M. Bouat. — Utilization of potassium 40 and potassium 42 in agronomy 89
M. Clairon, W. Routchenko. — The control of the mineral nutrition of plants by analyzing the extracts of the conducting tissues, with particular reference of Lucerne 201
A. P. Conesa. — Various aspects of phosphorus distribution in limestone soils 225
M. Coppenet. — Results of twelve years' lysimetric observations at Quimper (France) (1954-1965) 111
Marielle Courau. — Experimental study of the circulation of saturating water in artificial porous media 5
J. Decau. — Contribution to the study of the effects of environmental conditions on the soil's nitrogen distribution. II. Amino-acids extracted by hydrolysis 35
J. Decau. — Some observations on the influence of environmental conditions on the distribution of nitrogen in the soil. III. Amino-acids and aeration conditions 277
J. Dejou, J. Guyot, Colette Chaumont, Huguette Antoine. — New observations on the presence of gibbsite in areas of superficial decomposition and soils of crystalline and crystallophyllic massifs 639
M. Dupuis. — Determination of the carbonates in the granular fractions of various calcareous and dolomitic soils 61
A. Faure. — Contribution to the study of the action of a mould board on the soil. I. Study of the geometrical disposition of mould boards. Classification 565
A. Feodoroff, J.-L. Ballif. — A study of the rain infiltration in field conditions by means of tensiometers 475
J. Guyot. — Measuring, by adsorption, the specific surfaces of clay soils 333
P. Jacquard, L. Croisier, G. Monnier. — A study of the residual effects of fodder crops on subsequent arable crops. I. Residual effects of lucerne on wheat and maize 371
C. Juste, J. Delas. — Effects of the degree of salification of a humic compound on its thermal properties 145
G. Lefevre, G. Hiroux. — Effects and post-effects upon wheat of a nitrogen fertilization with *Italian Rye-Grass* 15
G. Lefevre. — Observations on simultaneous variation of the water and mineral nitrogen-content of a soil 627
F. Lemaire. — Effect of nitrites on plants 317
H. Manichon, M. Sébillotte. — An example of the determination of technical references : working times. A contribution to a better choice of crop rotation 305

J. R. MARTY, Marielle COURAU. — The influence of the cultivation methods on the water flow in an ill-structured soil 361
M. MINGEAU. — Effects of mineral nutrition on water behaviour of the plant.. 263
R. MOREL. — Trial of quantitative determinations relating to nitrogen evolution in a soil cultivated in nitrogenous balance 161
R. PROST. — General comments on the application of infra-red spectroscopy in the study of silicates 547
J. PUECH. — Experimental study of the circulation of not saturant water in different soils towards an adsorption zone 245
J. PUECH. — Transfer capacity of soil water and an attempt to interpret the flow 505
J. PUECH, C. MAERTENS, J. R. MARTY. — Methods of draining soil planted with crops sown in lines 597
Ginette SIMON-SYLVESTRE. — Soluble-sulphate contents of soils 435
Ginette SIMON-SYLVESTRE. — First results of an investigation into the total sulphur content of the cultivated soils of France 609

Complementary note

J. DEJOU, J. GUYOT, J. MORIZET, M. JAMAGNE, Marguerite MARIN. — Black soils, with a high percentage of organic matter, on leucogranites in the area of Eymoutiers-Peyrat-le-Château 517

Analytical note

J.-C. FARDEAU, J.-P. MICHEL. — Extraction and quantitative analysis of phosphate ions in soil solutions 645
Eliane MORE. — On the colorimetric estimation of cobalt in vegetable matter : iron interference, contaminations through the soil 527

Books review 105, 217, 449, 539

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication: M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 3-1970

Dépôt légal: 1er trimestre 1970. N° d'impression: 293.